

반복삼축시험에 의한 실트 모래 지반의 액상화 특성 연구

The Study on Liquefaction Characteristics of Silty Sand Soils by Cyclic Triaxial Test

이 송^{*1}

Lee, Song

전 제 성^{*2}

Jeon, Je-Sung

김 태 훈^{*3}

Kim, Tae-Hwun

Abstract

The cyclic triaxial test was carried out to research liquefaction characteristics and sample disturbance effects of silty sand soils at the west coast in Korea. First, liquefaction in silty sand was generated when axial strain approached to $\pm 10\%$ of strain and behavior of pore pressure was similar to the formula suggested by Seed, Martin, and Lysmer(1975). Also, it was found that dilatancy was generated at failure. Secondly, the liquefaction evaluation methods suggested by many researchers were carried out and the results were compared. In these methods the weak depth in liquefaction was similar and the method carried out by cyclic triaxial test on remolded sample showed the least safety factor. Thirdly the stress ratio by cyclic triaxial test was compared with that obtained from SPT N-value as a kind of empirical methods. It was found that the effect of sample disturbance was relatively small when SPT N-value was less than 20, but there were large differences in safety factor and resistance of liquefaction in soil by the effects of disturbance and remolding when SPT N-value was more than 20.

요 지

국내 서해안 실트질 모래의 액상화 특성과 시료교란의 영향을 파악하고자 교란된 시료를 재성형하여

*1 정희원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 박사과정 수료

*3 정희원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 석사과정

반복삼축시험을 수행하였다. 먼저, 실트질 모래의 응력-변형 거동에서 축변형률 $\pm 10\%$ 근처에서 액상화 현상이 발생했으며, 간극수압 거동은 Seed, Martin, Lysmer 등(1975)이 제안한 식과 거의 유사했다. 또한, 시료의 파괴시 dilatancy 현상을 살펴볼 수 있었다. 다음은 여러 연구자들이 제안한 액상화 평가방법들을 실시하여 그 결과를 비교했을때 액상화에 취약한 심도를 비슷하게 나타내고 있었으며, 재성형을 실시한 반복삼축시험을 통한 방법은 그 중 가장 낮은 안전율을 나타내고 있었다. 또한, 반복삼축 시험으로 구한 응력비와 경험적 방법의 표준관입시험 N값으로 구한 응력비를 비교했을때 시료교란의 영향은 N값이 20 이하에서는 상대적으로 작지만, N값이 20이상일 때 교란의 효과와 시료 재성형시의 문제점 등으로 액상화 저항력과 안전율에서 큰 차이를 보였다.

Keyword : Liquefaction, Dilatancy, Cyclic shear stress ratio, Empirical method, Disturbance effect

1. 서 론

한반도의 지진 발생은 길게는 약 300년 짧게는 약 20~30년의 주기로 크고 작은 지진들이 발생하고 있다. 곧 한반도가 지진에 대한 안전지대로 볼 수 없는 것이다. 이러한 이유로 최근들어 중요 구조물의 막대한 피해를 방지하기 위해 내진설계를 실시하고 있다. 특히, 사질토 지반의 액상화로 기인한 지반의 변형이 구조물의 심각한 손상을 주는 경우가 많아 이에 대비한 지반의 액상화 방지대책을 수립하고 있다. 중간입자의 균등하고 느슨한 사질토 지반에 액상화가 발생하기 쉽지만, 실트질 지반의 경우 지진으로 발생되는 지반의 액상화 및 반복변동(cyclic mobility)에 대한 연구가 미흡하게 이루어져 있다.

본 논문은 서해안 실트 모래지반 현장의 액상화에 대한 영향을 연구하기 위하여 반복삼축시험을 실시하였으며, 표준관입시험의 N값 등 다양한 현장 실험과 실내 실험의 자료를 이용하였다. 반복삼축시험에서는 반복횟수에 따른 간극수압의 발달형태, 이와 병행하여 축변형률의 거동을 실험을 실시하여 고찰하였다. 하지만, 실내 시험시 시료 샘플링, 운반, 성형과정 등을 신중하게 실시한다고 하더라도 액상화에 큰 영향을 미치는 상대밀도 등의 인자들에 상당한 변화를 주게 된다. 이에 교란된 시료를 현장의 단위중량으로

재성형하여 반복삼축시험을 하므로써 시료 교란에 따른 지반의 액상화 저항능력을 경험적인 방법으로 구한 액상화 저항능력과 비교 연구하였다.

또한, 지반의 여러 액상화 평가방법을 실시하여 상호 그 결과를 비교 연구하였다.

2. 지반조사 및 반복삼축시험

2.1 지반조사

본 논문은 그림 1에서 보는 바와 같이 B-3, B-6은 반복삼축시험을 이용한 본 실내 시험을 실시하여 자료를 얻었으며, 나머지 기본 자료들

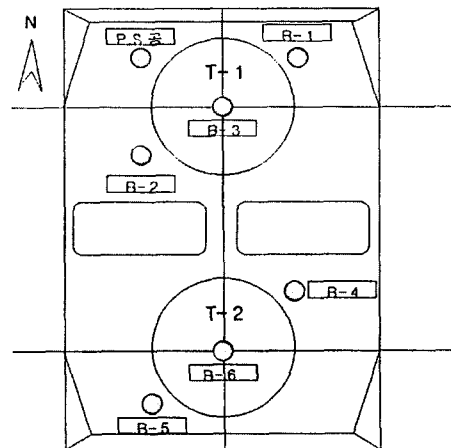
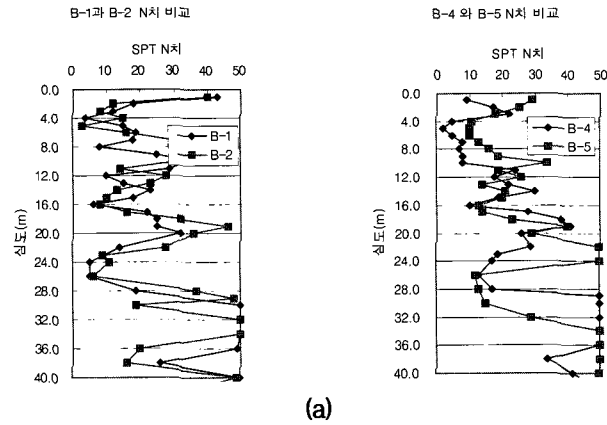
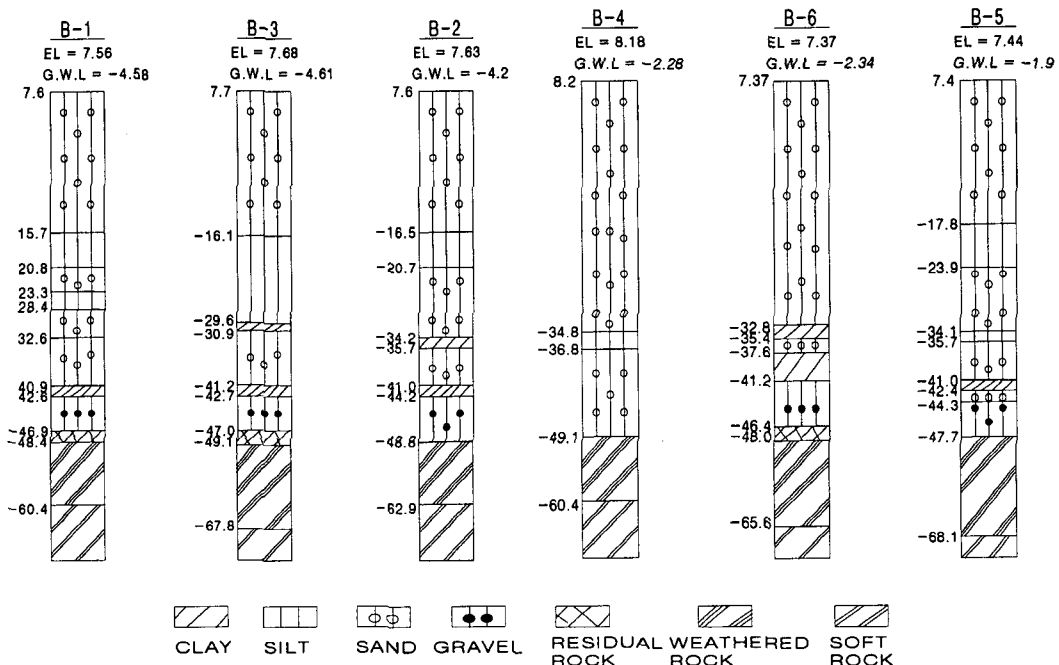


그림 1. 현장조사 위치도



(a)



(b)

그림 2. (a) 표준관입시험의 N값, (b) 지반 보링 로그

은 서해안 현장의 실내 및 현장 실험결과를 이용하였다. 이에 B-1, B-2, B-4, B-5의 표준관입시험을 이용한 지반의 N값과 실내 토성 실험을 통한 흙분류 및 입도분포 자료를 이용하였으며, 또한, P.S 검층의 탄성과 탐사, B-3, B-6 실내 공진주 시험의 자료를 이용하였다.

그림 2의 표준관입시험치 N값과 보링 주상도를 살펴보면 B-1과 B-2, B-4와 B-5가 유사함을

볼 수 있다. 또한, 기본 토성치도 유사함을 볼 수 있었다. 이에 B-1과 B-2사이에 탱크 중앙의 B-3도 거의 유사한 지반형태를 취하고 있음을 예측할 수 있다. 즉, 지표면이 수평으로 퇴적된 지반이기에 수평방향으로 비슷한 지질구조를 예측할 수 있는 것이다.

따라서, B-1, B-2, B-4, B-5의 N값을 이용한 액상화 저항능력과 B-3, B-6의 반복삼축시험을

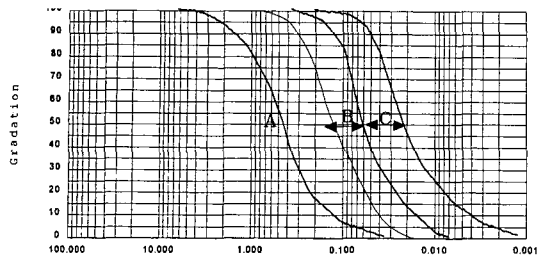


그림 3. T-1, T-2 지역 사질토 지반의 전반적인 입도분포 범위

통한 액상화 저항능력으로 액상화 가능성의 비교 평가가 가능하다.

그림 3은 실험을 실시한 지역의 전반적인 입도분포를 보여주고 있다. A 입도분포 근처는 세립토 함유율이 10% 안팎의 작은 경우이며, B 구역은 실트질 모래로서 30m 이전 층이 대부분을 차지하며, C구역은 ML과 CL이 차지하는 범위이다. 이 지반은 전반적으로 SM 또는 ML로서 세립토 함량이 35%를 초과하는 층이 대부분이며, 평균 입경(D_{50})이 SM은 대부분 0.06~0.14 mm 사이에 있으나, 지표면 근처와 30m 이상의 심도에서 0.2 mm 이상의 평균 입경이 존재한다. ML과 CL층의 평균입경은 0.06~0.03 mm 사이에 존재한다. 세립토 함량이 크면 클수록 액상화 저항력은 증대되므로 액상화 가능성이 줄어들지만, 그림 3에서 실트질 모래층 대부분이 평균 입경 0.075~0.2 mm 사이 존재하고 균등계수 10이하의 입도가 나쁜 경우가 많아 액상화에 민감한 입도분석을 취하는 심도가 존재하고 있다.

2.2 시험 장비 / 방법

본 연구에서 cyclic 시험시 심도가 깊어질수록 구속압이 더욱더 커지므로 일정한 진동수를 유지하기 힘들게 된다. 따라서, 높은 구속압하에서 0.1 Hz의 진동수를 일정하도록 맞추기 위해 oil actuator를 air actuator로 바꾸어야 함으로 처음부터 air actuator로 세팅후 실시하였다. 이는

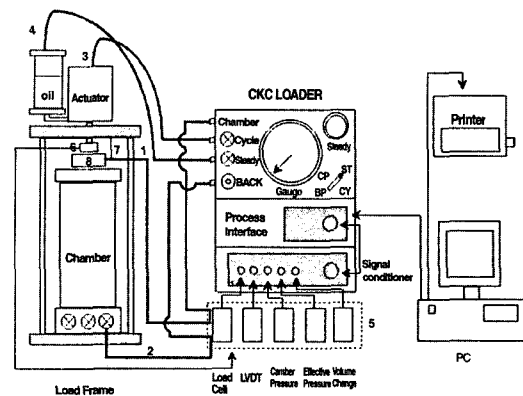


그림 4. 자동화 삼축시험장치

저진동수의 cyclic 시험 형태에서 dynamic 시험이 되는 것이다. closed-loop의 제어형태에서 open-mode 형태로 바뀌게 되어 실험자가 각각의 응력을 설정 후 시험기에 나타나는 실제 응력에 맞추어 시험하여야 한다.

시험장비는 그림 4와 같이 구성되어 있으며 압력은 공기압을 이용한다. 시험장치의 e/p transducer는 습기에 의한 영향이 크기 때문에 Air compressor와 e/p transducer 사이에 air-filter, air-cooler와 air-dryer를 장치하여 이물질과 습기를 제거한다. 또한, 탈기장치를 구비하여 셀압을 가할 시 물속의 공기가 압축되어 실제 압력보다 작은 압력이 시료에 전달되는 현상을 억제하도록 하였다.

본 연구에서 사용된 시료는 서해안 현장의 실트질 흙으로서 불교란 시료를 채취하기 곤란하여 교란시료를 성형하여 실험을 시행하였다. 교란된 시료의 성형방법에는 수중낙하법, 습윤다짐법, 진동다짐법, 공중낙하법 등의 방법이 있으나, 현장의 상대밀도와 유사하도록 하기 위해 습윤다짐법을 사용하여 직경 50 mm, 높이 100 mm로 성형제작하였다. 그리고, 시료속의 공기를 제거하기 위해 진공압을 1~2시간 주어 시료속에서 기포가 발생하지 않을 때 까지 가했다. 그 후 포화단계로 들어가 배압을 가하여 B값이 0.97 이

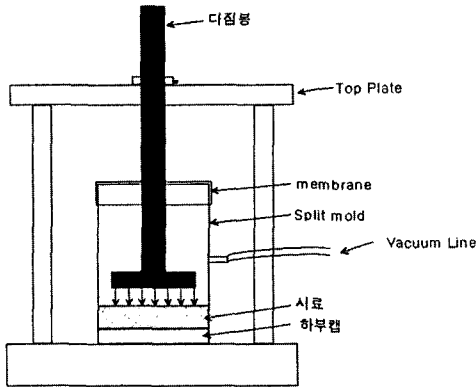


그림 5. 시료성형장치

상이 되면 다음 단계인 압밀 단계를 실시하였다. 압밀 단계에서는 현장의 구속압에 해당하는 압력을 주어 현장조건을 재현시켰으며, 비배수 전단과정에서 반복재하 하중을 0.1 Hz의 진동수로 가하여 그때의 간극수압과 반복횟수, 축차응력을 파악하였다. 지진과 일치하는 진동수의 범위 0.05~12 Hz에 있어서 액상화 강도에 대한 진동수의 영향은 미약하므로 무시될 수 있다고 한다 (Handbook on liquefaction remediation).

실험시 액상화 시점을 찾아내기 위해 Castro가 제안한 유효응력이 0이 되어 완전한 파괴가 이루어 질 때를 그 시점으로 하는 경우가 있지만, 액상화 시점을 용이하게 찾기 위한 방법으로서 Seed 등이 제안한 간극수압이 계속 상승하여 특정 반복변형률에 도달하는 시점을 채택하였다. 이 때의 축변형률을 $\pm 10\%$ 으로 잡았다.

3. 액상화에 영향을 미치는 인자들과 교란의 영향

반복삼축시험을 할 때 영향을 미치는 요소에는 주로 흙의 입도/ 구조, 상대밀도, 구속압력, 최대 축차응력, 반복횟수들이 주요 영향인자이며 표 1에 상세하게 액상화 강도에 영향을 미치는 인자들을 제시하였다.

표 1. 액상화 강도에 영향을 미치는 인자들

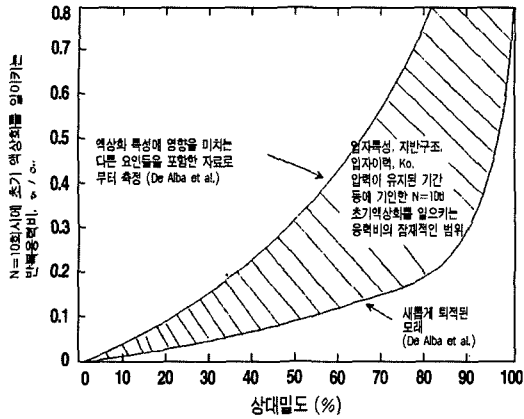
하중조건	반복전단응력의 크기
	진동파 형태
	진동주기
	진동파에 있어 불규칙성
	다방향의 전단력
지반조건	상대밀도
	입도분포
	흙입자의 구조
	반복전단의 이력
	고결화 효과
응력조건	평균 유효주응력
	과압밀비
실험조건	시료크기
	시료준비방법
	압밀시간
	멤브레인 관입
	B 값
	실험장치의 종류와 구조

액상화를 평가하기 위하여 교란된 시료를 성형하여 실험을 실시하면 흙입자들의 분포형태 / 퇴적구조, 장기간 유지된 압력 또는 지반구조의 2차 압축에 의한 고결화 및 접촉부의 불합효과, 지진하중과 같은 이전 변형을 이력에 의한 구조적 변화 및 정지토압계수의 변화 등 지반 특성인 영향인자들이 사라지게 된다. 이러한 재성형된 시료와 불교란 시료 사이에 비교를 통한 그 영향성을 그림 6(a)에서 보여주고 있다. 또한, 다양한 재성형 방법에 따른 반복전단응력비의 변화를 그림 6(b)에서 보여주고 있다.

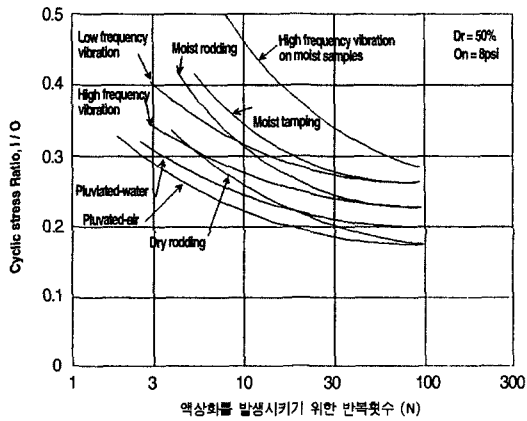
Seed(1979)는 모래의 고결화 또는 aging의 존재 여부가 액상화 저항능력을 50% 이상 증대시키며, 다른 다짐 기법이 액상화 저항능력을 $\pm 50\%$ 나 변화시킬 수 있다고 하였다.

4. 액상화 평가 방법

액상화 예측을 위한 평가방법들에는 Seed와 Idriss(1971), Seed 등(1984), Iwasaki와 Tatsuoka (1978), Tokimatsu와 Yoshimi(1983), Dobry 등



(a) 현장 퇴적지의 액상화 특성이 측정된 범위 (De Alba 등, 1975)



(b) 다른 다짐절차에 따른 반복응력비와 반복횟수의 관계 (After Mullis, Chan와 Seed, 1975)

그림 6: 재성형시료의 액상화 평가시 영향요소

(1979) 등 여러 방법들이 제안되어 있다. Seed 등(1984)은 유효상재압, 표준관입시험의 에너지 효율, #200번체를 통과한 세립토 함량을 고려한 반복전단응력비를 구해서 지진규모 $M=7.5$ 를 기준으로 지진규모별 보정계수를 취하여 각각의 지진 규모별 액상화 안전률을 산정하였다. 이 방법의 평가를 위한 한계심도는 20m이다. Iwasaki 등은 N_{60} , 평균입경, 세립토 함량을 고려하여 지진규모 $M=7.5$ 를 기준으로 액상화 안전률을 산정하였다. 이 방법은 한계심도는 20m까지 가능하

다. Tokimatsu와 Yoshimi는 과거 지진기록의 해석결과와 반복삼축시험결과 등에서 얻은 여러 실험식을 조합한 방법으로 N_{60} , 세립토 함량, 유효상재압을 고려하여 지진규모에 따른 전단변형률에서 반복 전단 응력비를 구하여 액상화 안전률을 산정하였다. 이 방법에서 전단변형률 5%가 액상화된 사례와 액상화되지 않은 사례 경계로 나타나며, 주로 건축물 등에서 이용되고 있다. Dobry 등(1979)은 지반에 발생하는 반복하중에 의해 발생하는 액상화 현상을 지반의 초기전단 변형률(threshold strain)을 이용하여 액상화 현상을 판정하였다. 이 방법은 다른 방법에 비하여 매우 보수적인 결과를 얻는다.

이러한 평가방법들의 일반적인 흐름도가 그림 7에 제시되어 있다. 하지만, 본 논문은 지진응답 분석을 실시하지 않고 액상화 평가 간편법을 사용하였으며, 지표면 최대가속도가 지표근처에서 거의 비슷하므로 심도별로 균일하다는 가정하에 각 심도별로 지진시 발생하는 전단응력을 산정하였다.

4.1 진동삼축시험을 통한 액상화 예측 (Seed와 Idriss, 1971)

그림 8에서 진동삼축시험을 통한 액상화 간편 평가 절차가 제시되어 있다. 여기서, C 는 지진규모별 보정계수로 Seed 와 Idriss는 0.65로 제안했으며, C_D 는 stress reduction factor로 지반 심도가 9m보다 작을 경우 0.9이며, 이상일 때는 $C_D = 1-Z/90$ 을 따른다.

일본에서는 지진규모별 보정계수 C 를 $0.1(M-1)$ 로, 응력감소계수 C_D 를 $1-0.015(m)$ 로 제한하고 있다. 또한, C_r 은 실험실에서 구한 응력비를 현장치로 보정해주는 계수로 그림 9에 상대밀도에 대해서 보여주고 있다.

표 2. 액상화 저항력에 대한 지진강도 영향에 대한 보정계수(Seed 등,1983)

지진규모 (M)	반복횟수 (N_c) = $0.65 \tau_{max}$	$\frac{M=M \text{ 일때의 액상화 저항력}(\tau_{av}/\sigma'_o)}{M=7.5 \text{ 일때의 액상화 저항력}(\tau_{av}/\sigma'_o)}$
5.25	2~3	1.50
6.00	5~6	1.32
6.75	10	1.13
7.50	15	1.0
8.50	26	0.89

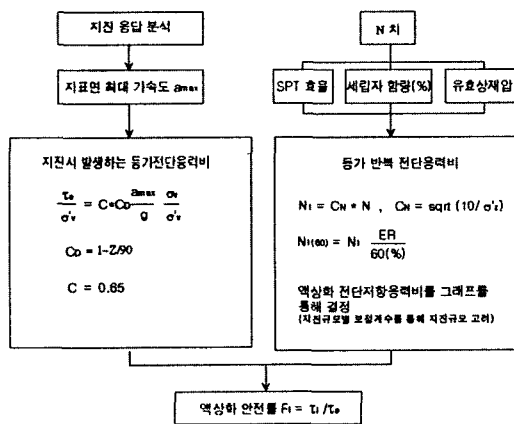


그림 10. Seed 등(1984)의 표준관입시험 N치를 이용한 방법

4.2 Seed 등(1984)의 표준관입시험 N치를 이용한 방법

그림 10에서 C_N 은 유효상재압효과를 고려한 보정계수이며, ER은 표준관입시험의 에너지 효율이다. 등가반복횟수 N_c 는 지진의 규모에 따라 달라지며, 그림 11은 세립자 함량에 따른 표준관입시험의 수정 N치에 대한 액상화 저항응력비를 보여주고 있다. 또한 표 2에서 지진규모별 지진 보정계수를 이용하여 임의 지진규모에 대한 액상화 저항력을 산정한다.

4.3 Iwasaki와 Tatsuoka의 간이방법

그림 12에서 $\gamma'_d = 1 - 0.015Z$ 로서, Z는 지표면으로부터 심도이다. 유효상재압이 $0.2 \sim 1.7 \text{ kg/cm}^2$

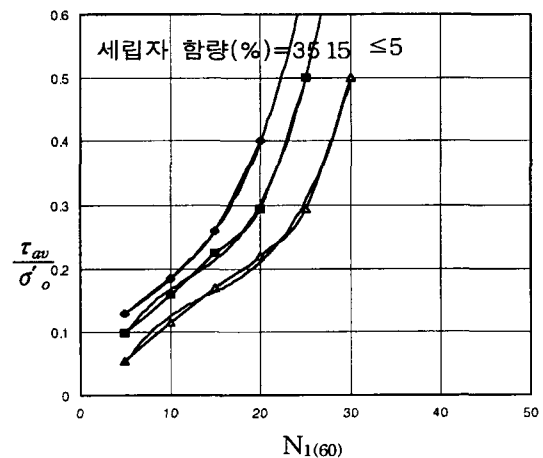


그림 11. 지진규모, M=7.5에서 실트질 모래에 대한 액상화를 발생시키는 전단응력비와 (N_1)₆₀과의 관계(Seed 등, 1984)

범위이내이고, 평균입경이 0.04~1.5 mm인 정규 압밀된 매립사질층과 층적사질층에 대해서 구한다. 이때 반복전단 응력비는 반복횟수가 20회 일 때의 값이다. 여기서, C_1 은 반복삼축시험과 원위 치간의 구속응력 차이에 대한 보정계수로서 $(1+2K_0)/3$ 이며, C_2 는 지진파의 불규칙성에 대한 보정계수로서 $1/0.55 \sim 1/0.7$ 값을 갖는다. C_3 는 시료의 흐트러짐에 대한 보정계수이며, C_4 는 시료 채취에서 시험할 때까지 생기는 밀도화에 대한 보정계수로서 $C_3 \times C_4 \approx 1.0$ 이다. C_3 는 수평면에서 진동의 2차원성에 대한 보정계수로서 약 0.9 이다.

또한, SPT의 N치를 이용하여 반복전단응력비를 구할 수 있으며, 본 논문은 N치를 이용하여 R_{max} 를 산정하였다.

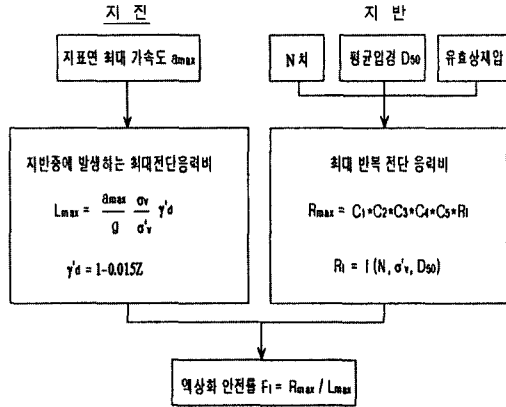


그림 12. Iwasaki와 Tatsuoka 방법에 의한 액상화 간이에측법

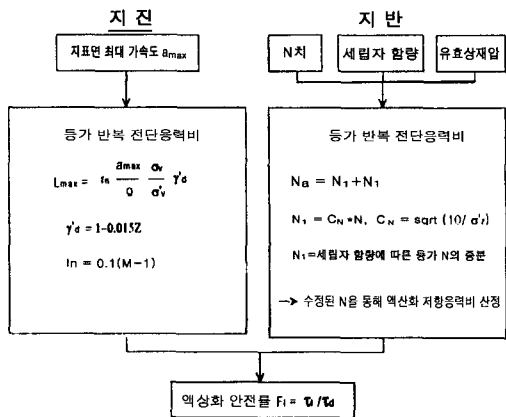


그림 13. Tokimatsu와 Yoshimi의 방법에 의한 액상화 간이에측법

$0.02 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.05 \text{ mm}$ 일 때
 $R_{\max} = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} + 0.19$
 $0.05 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.6 \text{ mm}$ 일 때
 $R_{\max} = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} + 0.225 \log_{10} \left(\frac{0.35}{D_{50}} \right)$ (1)
 $0.6 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 2.0 \text{ mm}$ 일 때
 $R_{\max} = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} - 0.05$

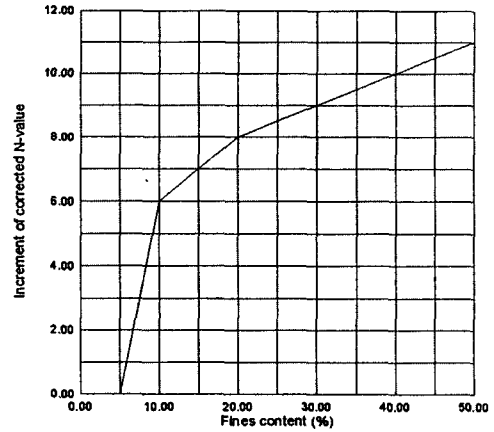


그림 14. 세립자 함유율과 보정 N치 증분 관계

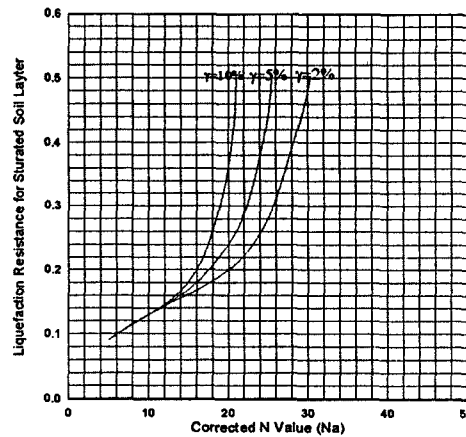


그림 15. 보정 N치에 따른 액상화 저항력

4.4 Tokimatsu와 Yoshimi의 간이 방법 (육상건물 기초)

그림 13에서 기본 평가 순서도가 제시되어 있으며, 이 방법은 과거 지진기록의 해석결과와 반복삼축시험결과 등에서 얻은 여러 실험식을 조합하여 Tokimatsu와 Yoshimi가 제시했다. 전단 변형 진폭 5% 곡선이 액상화된 사례와 액상화되지 않은 사례의 경계를 잘 나타낸다.

여기서 세립자 함유율에 따른 보정을 그림 14를 이용하여 실시한 후 수정 N치를 사용하여 그림 15의 전단 변형 진폭 5%에서 액상화 저항력

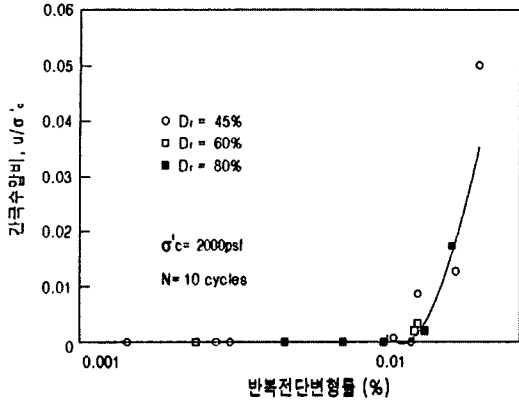


그림 16. 10회 반복하중 이후 간극수압의 상승 (Dobry 등, 1979)

을 산출하였다.

4.5 초기 전단 변형률 방법 (Dobry 등, 1979)

초기 전단 변형률 방법은 비배수 반복 하중을 받는 동안 포화된 모래의 간극수압 상승을 정의하기 위해 사용된다. 시료의 입자구조가 응력 제어 실험보다 변형률 제어 시험이 시험 결과에 있어 훨씬 적은 영향을 미치며, 응력 제어 실험에 영향을 미치는 입자구조, 상대밀도 등이 변형률 제어 실험에서는 매우 감소하거나 사라지게 된다. 이 접근법에서 핵심요소는 과잉간극수압을 발생시키는 초기 반복 전단 변형률의 이용이다. 실험과 이론상으로 그러한 초기 반복 전단 변형률은 0.01%이다. 반복 전단 변형률 방법은 평탄한 지역의 지진의 액상화 잠재력을 평가하기 위해 제안되었다. Dobry(1981)는 초기 반복 전단 변형률의 전형적인 값이 약 0.01%이며, 계산된 변형률 값이 초기 반복전단 변형률 값을 넘지 못한다면 액상화에 대하여 안전하다고 하였다.

그림 16에서 $45\% \leq D_r \leq 80\%$ 의 범위에서 상대밀도에 무관해 보이는 초기 전단 변형률이 $1.1 \times 10^{-2}\%$ 로 보이고 있다. 여기에서 반복횟수 10회

동안 그리고 초기 전단 변형률보다 약간 더 큰 변형률의 수치에 있는 동안 간극수압의 상승률은 주로 전단 변형률에 의존함을 볼 수 있다. 또한 상대밀도에 상대적으로 예민함을 보이지 않고 있음을 볼 수 있다.

Dobry 등(1979)은 반복전단 변형률을 이용하여 지진동안 평탄한 지역에서 포화된 사질토층의 액상화 가능성과 간극수압 상승을 평가하기 위해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\gamma_e = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_v C_D}{G_{\max} (G/G_{\max})^{\gamma_e}} \quad (2)$$

여기에서, C_D 는 reduction factor로서 Seed와 Idriss(1971)가 제안한 값이며, a_{\max} 는 지반 최대 가속도, g 는 중력가속도, G_{\max} 는 최대전단계수, σ_v 는 수직응력, G/G_{\max} 는 초기전단변형률이 생길 때의 G/G_{\max} 이다.

5. 실험결과

5.1 반복삼축시험의 결과

반복삼축시험에서 진동수 0.1과 반복횟수 10회를 기준으로 각 심도에 맞는 유효응력을 주어 그때의 반복 전단 응력비를 산정하였다.

그림 17에서 반복삼축시험의 시험결과중 한 예를 보여주고 있다. 본 실험에서는 현장의 구속압 만큼 압밀을 시킨 후 일정한 반복하중을 줌으로써 Seed 등이 제안한 양진폭 10%에 도달하는 반복횟수를 찾아냈다. 거의 이 시점에서 유효응력이 0에 도달하고 있다. 그림 17(a)는 축차응력이 사인파의 형태로 압축과 인장을 가하고 있는 것을 보여주고 있으며, 그림 17(b)는 이러한 압축과 인장의 반복횟수에 따른 축변형률의 거동을 보여주고 있다. 여기에서 50회를 기점으로 갑작스러운 축변형률의 증가를 볼 수 있다. 이 시점에서 유효응력은 간극수압의 상승으로 미약하

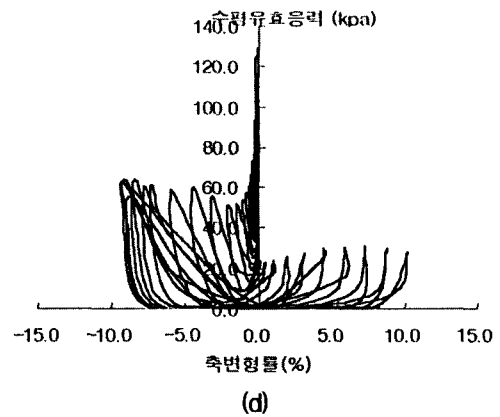
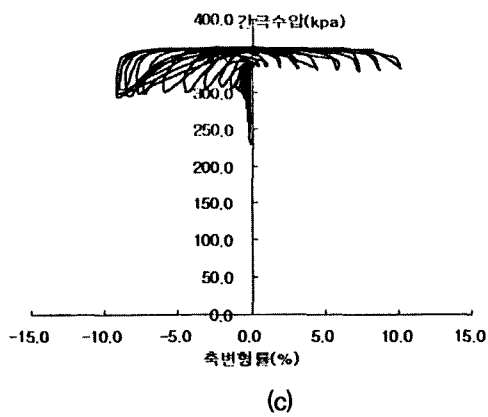
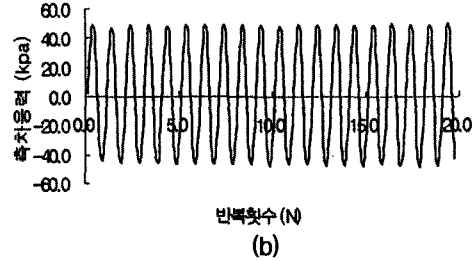
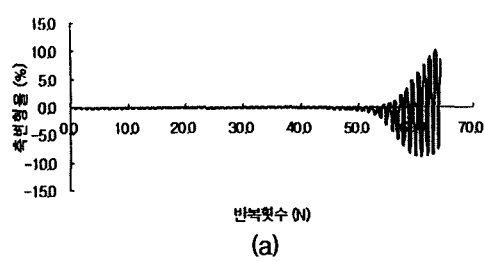


그림 17. B-3 (7~8m)의 반복삼축시험 결과

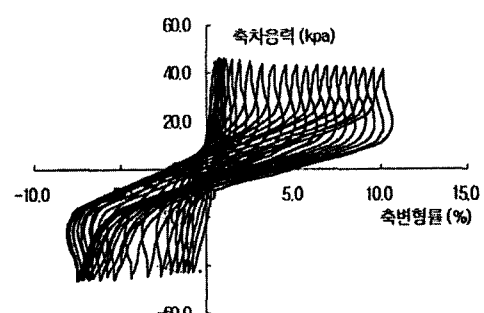
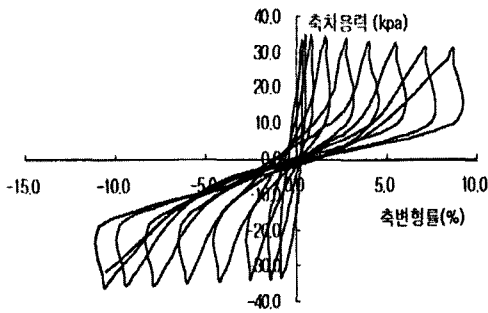


그림 18. 반복삼축시험의 B-6공 1~2m의 응력-변형률 거동

게 남아있다. 그 후 반복횟수가 58회가 되었을 때 완전 소실되었다. 또한, 그림 17 (c), (d)에서는 축변형률에 대해서 반복하중동안 간극수압 증가에 따른 유효응력의 거동을 보여주고 있다.

그림 18은 시료내부에 발생하는 응력-변형률의 거동을 보여주고 있다. 즉, 시료 내부 대각선 방향으로 발생하는 전단응력 = $\pm \sigma_d/2$ 과 축변형

률을 통한 전단변형률을 보여주고 있는 것이다.

표 4에서 보듯이 축차응력을 변화시켜 반복횟수에 따른 반복전단응력비를 그림에 플롯하여 그 값을 구하였다. 그림 19는 표 4에서 세번의 실험에 따른 반복전단응력비를 결정하는 것을 보여주고 있다. 이러한 종합적인 결과가 표 3에 제시되어 있다.

표 3. B-3, B-6공의 반복삼축시험 결과

Boring No.	Depth (m)	γt (t/m ³)	W_i (%)	Dr (%)	σ'_3 (kPa)	f (Hz)	stress ratio(R)	Cyclic Number	W_f (%)
B-3	4~5	1.83	26.30	40.0	83	0.1	0.24	10	30.10
	5~6	1.98	27.00	45.0	96		0.315		32.13
	7~8	1.97	30.35	48.0	125		0.24		31.83
	10~11	2.14	26.75	52.0	165		0.29		25.53
	11~12	2.15	28.50	52.0	176		0.394		31.20
	16~17	2.21	29.65	55.0	245		0.20		22.33
	19~20	1.99	26.50	50.0	275		0.188		28.85
	21~22	2.16	29.00	52.0	300		0.21		22.03
	24~25	1.98	30.50	75.0	320		0.17		29.48
	25~26	2.11	30.75	75.0	325		0.19		24.47
	29~30	1.93	29.65	60.0	320		0.175		30.13
	35~36	1.89	29.15	70.0	361		0.18		28.33
	37~38	2.10	22.20	78.0	460		0.305		25.28
	43~44	2.04	20.15	76.0	497		0.17		18.58
B-6	1~2	2.06	26.20	35.0	31		0.515		28.09
	2~3	1.88	26.10	35.0	42		0.23		30.19
	5~6	1.98	25.00	50.0	71		0.25		25.94
	6~7	1.97	26.25	55.0	109		0.184		30.08
	10~11	2.06	26.75	65.0	150		0.325		27.49
	21~22	2.05	29.00	42.0	245		0.1788		21.88
	23~24	2.05	29.90	60.0	265	0.148	22.43		
	26~27	2.02	31.05	75.0	296	0.096	24.46		
	29~30	1.84	29.65	65.0	321	0.145	30.28		
	31~32	2.00	25.50	65.0	341	0.168	29.86		
	33~34	1.93	21.40	75.0	358	0.335	28.31		
	34~35	1.93	25.40	75.0	368	0.170	30.15		
	39~40	1.95	19.90	76.0	415	0.25	25.06		
	43~44	2.04	20.15	80.0	457	0.148	24.12		

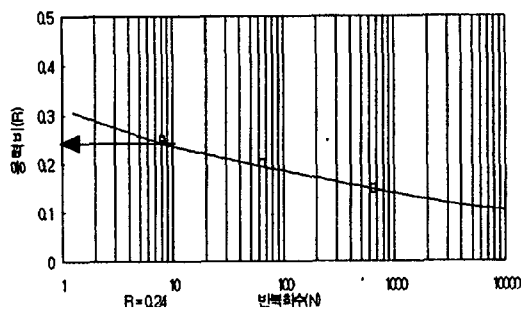


그림 19. B-3 (7~8m)의 반복전단응력비의 결정

Seed, Martin, Lysmer등이 반복횟수에 대한 간극수압 거동을 반복전단시험을 통해 1975년에 식 (3)과 같이 제안했다.

표 4. B-3 (7~8m) 실험 결과

Boring No.	Depth (m)	W_i (%)	Dr	σ'_3 (kPa)	f (Hz)	stress ratio (R)	σ_d (kPa)	Cyclic Number
B-3	7~8	30.35	48.0	125	0.1	0.144	36	300이상
						0.204	51	64.6
						0.244	61	8.1

$$u_g = \sigma_v \left(\frac{2}{\pi} \right) ASIN \left(\frac{N}{N_i} \right)^{\frac{1}{2} \alpha} \quad (3)$$

여기서, N_i 는 초기 액상화가 발생될 때의 반복 횟수, σ_v 는 초기 압밀압, u_g 는 과잉간극수압, N 는 반복횟수, α 는 상수 (≈ 0.7)이다.

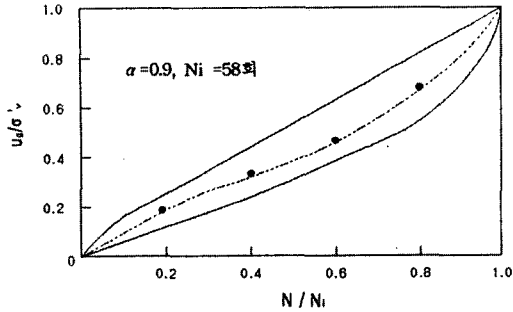
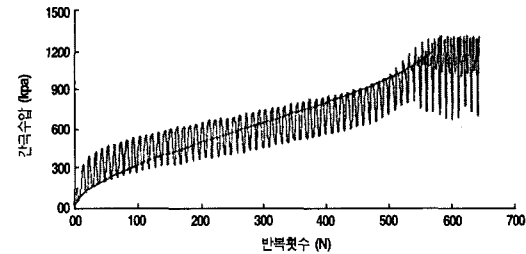
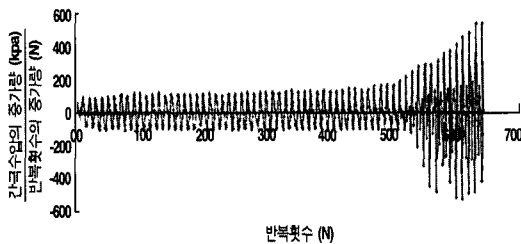


그림 20. 반복전단시험에서 과잉간극수압의 상승비(Seed와 Booker, 1977)



(a)



(b)

그림 21. B-3 (7~8m)의 반복삼축시험의 간극수압의 거동

식 3을 통하여 그림 20은 실제 간극수압이 상승하는 비슷한 거동을 보여주고 있다. 하지만, 액상화현상 이후의 거동은 보여주지 못하고 간극수압이 유효구속압과 같아질 때까지만 보여주고 있다. 반복횟수 증가에 대한 간극수압의 증가는 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial u_g}{\partial N} = \left(\frac{2\sigma_v}{\alpha\pi N_i} \right) \left[\frac{1}{\sin^{2\alpha-1} \left(\frac{\pi}{2} r_u \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} r_u \right)} \right] \quad (4)$$

$$r_u = \frac{u_g}{\sigma_v}$$

그림 21 (a)는 실제 과잉간극수압의 상승 형태와 식 3의 평균 과잉간극수압의 변동을 비교하고 있다. 식 3을 이용하여 $\alpha = 0.9$ 와 초기 액상화가 발생할 때의 반복횟수 $N_i = 58$ 회를 대입하면 실제 과잉간극수압의 거동과 거의 유사한 거동을 보여 주고 있다. 이러한 결과는 삼축시험장비를 이용한 반복삼축시험과 반복전단시험은 시료 내부에 발생하는 전단응력에 대한 과잉간극수압의 거동이 거의 유사하다는 것을 제시한다. 그림 21 (b)는 반복횟수의 증가량에 대한 간극수압의 증가량을 도시한 것이다. 여기에서 처음에는 반복횟수 0.1회 증가에 대해 간극수압의 증가량은 거의 일정하며 축변형률이 급격히 증가하면서 간극수압도 급격히 증가함을 보여주었다. 그 다음 유효응력이 완전 상실된 이후에는 간극수압은 일정한 값으로 더 이상의 증가는 없게 된다. 또한, 반복재하하중으로 인하여 간극수압이 상승하여 유효구속압이 거의 상실되었을 때 양진폭 10%에 도달하여 파괴가 이루어지면서 실트 모래는 밀도가 큰 깨끗한 모래의 거동을 보이며 흙의 다이러턴시가 동시에 발생하여 간극수압의 증가를 저해하고 있음을 50회 이후의 거동에서 볼 수 있었다.

5.2 액상화 예측법의 결과 비교

5.2.1 Cyclic triaxial test에 의한 방법 (Seed와 Idriss, 1971)

그림 22는 반복삼축시험을 통해 반복횟수 10회 즉, 지진규모 $M = 6.75$ 에서 액상화 저항능력을 구한 후 지표면 최대가속도를 0.1g, 0.15g, 0.2g를 주어 지반에 발생하는 전단응력을 구하여 안전율을 산정하였다. 안전율 산정시 20m이후에서는 액상화로 인한 지반 변형이 일어나도 지표 구조물에 영향이 매우 작으므로 20m 이전까지 산정하였다. 액상화에 취약한 지역은 B-3의 4, 7, 10, 17, 20m 심도 부근에서 안전율이 낮음을 볼

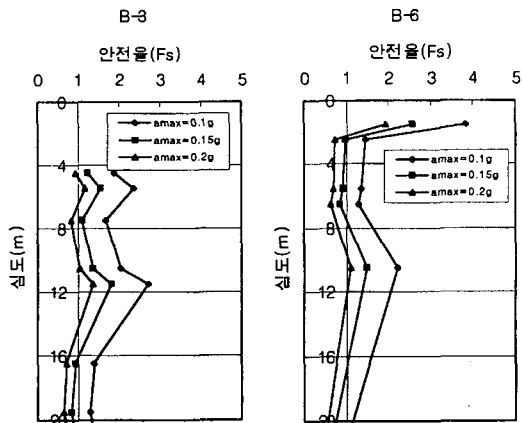
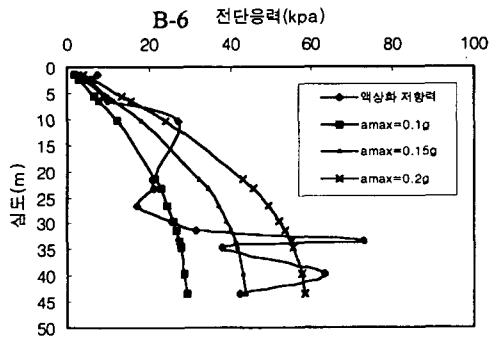
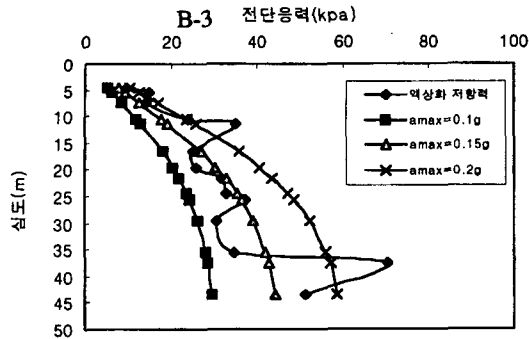


그림 22. Cyclic triaxial test에 의한 액상화 예측 수 있다. B-6은 4~7, 20m 부근이 취약한 지역이다.

5.2.2 표준관입시험의 N를 이용한 방법

표준관입시험의 N값과 그림 23, 24, 25에서 각각의 제안자들의 심도별 안전율 모양이 유사하며 각각의 연구자들의 액상화 평가방법에 따

른 안전율의 상대적인 크기는 다르지만, 공통적으로 N값이 낮은 지역이 또한 안전율이 낮음을 볼 수 있다.

5.2.3 초기전단변형률에 의한 방법 (Dobry 등, 1979)

이 방법은 반복하중에 대한 간극수압의 갑작스러운 증가를 보이는 초기전단변형률을 기준했으며, 초기전단변형률이 0.01%를 넘는다면 액상화 현상이 발생하기 쉬운 위험지역이라는 결과를 산출했기 때문에 간극수압의 상승으로 인하여 지반에 큰 변형이 일어나는 것을 액상화 시점으로 안전율을 산정한 다른 방법들에 비해 대단히 보수적인 결과를 보인다.

5.3 액상화 평가방법들의 결과 비교

그림 27은 반복삼축시험을 실시한 곳과 그 인접부근의 시추공의 N치 결과를 이용하여 안전율을 상호 비교하였다. 여기에서 반복삼축시험시 반복횟수를 10회, 즉 지진규모, $M = 6.75$ 를 사용하였는데 지진규모, $M = 7.5$ 로 각각 방법들의 일관성을 위해 표 2의 Seed 등(1983)이 제안한 지진규모별 보정계수를 이용하여 안전율을 산정하였다. 그림 27(a)는 B-3 지역에서는 반복삼축시험을 이용한 Seed와 Idriss(1971)의 방법과 B-1 지역에서 Seed 등(1984)의 N값을 이용한 방법, Iwasaki와 Tatsuoka의 방법, Tokimtsu와 Yoshimi의 방법들로 지진규모는 $M = 7.5$, 지표면 최대 가속도는 서해안 구역계수(0.11g)와 위험도계수(1.4)를 고려하여 0.154g로 하여 액상화 가능성을 비교하였다. 이러한 예측법들은 모두 비슷한 경향의 액상화 가능성 있는 심도(4m, 8m, 12m, 16m)를 제시하고 있었으며, Seed 등(1984)의 N값을 이용한 방법과 Tokimtsu와 Yoshimi 방법은 비슷한 예측을 하였다. Iwasaki와 Tatsuoka의 방

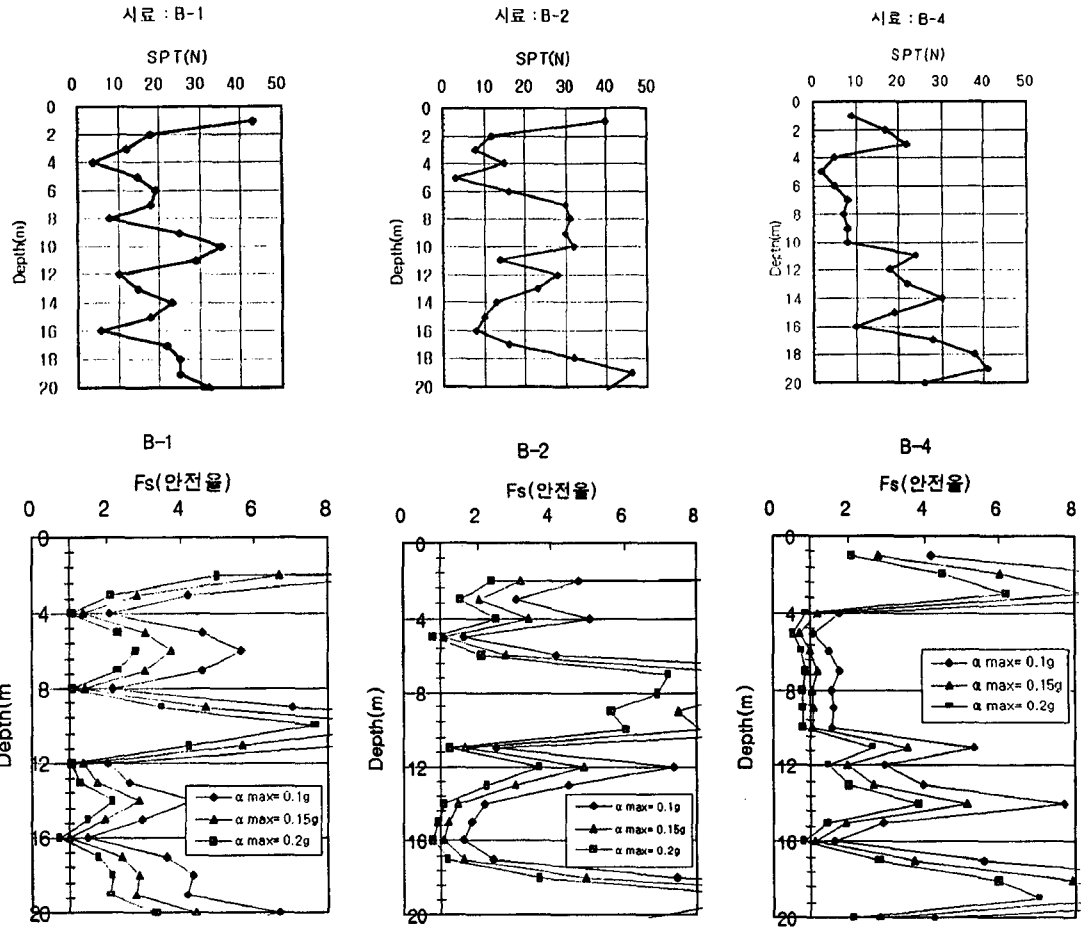


그림 23. N값에 의한 액상화 예측 (Seed 등, 1984)

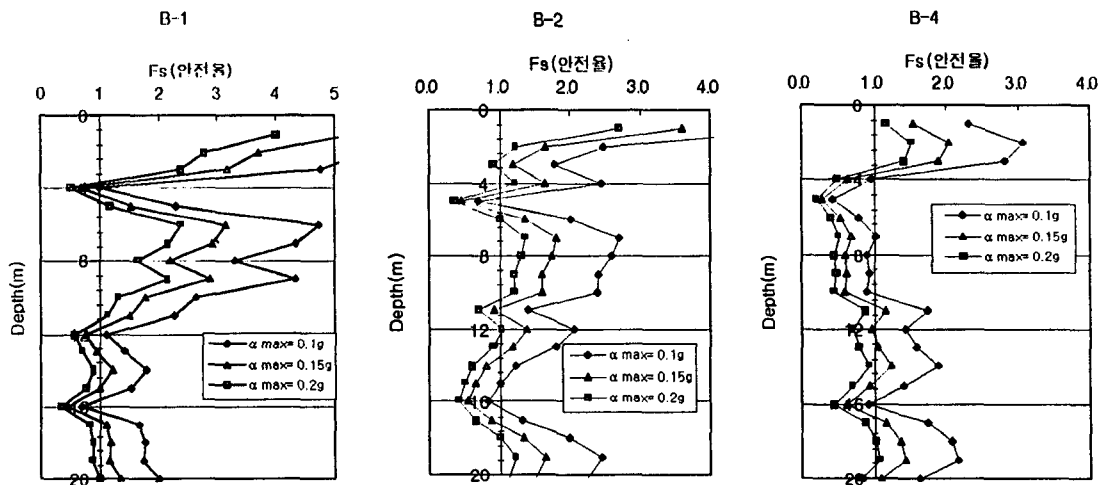


그림 24. Iwasaki와 Tatsuoka의 방법에 의한 액상화 액측

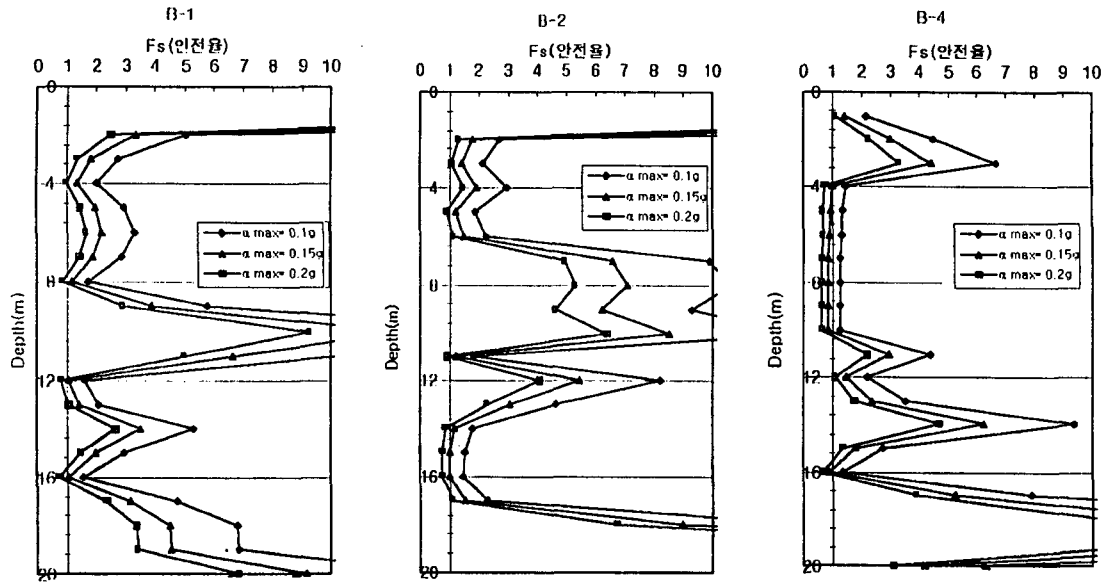


그림 25. Tokimatsu와 Yoshimi의 방법에 의한 액상화 예측

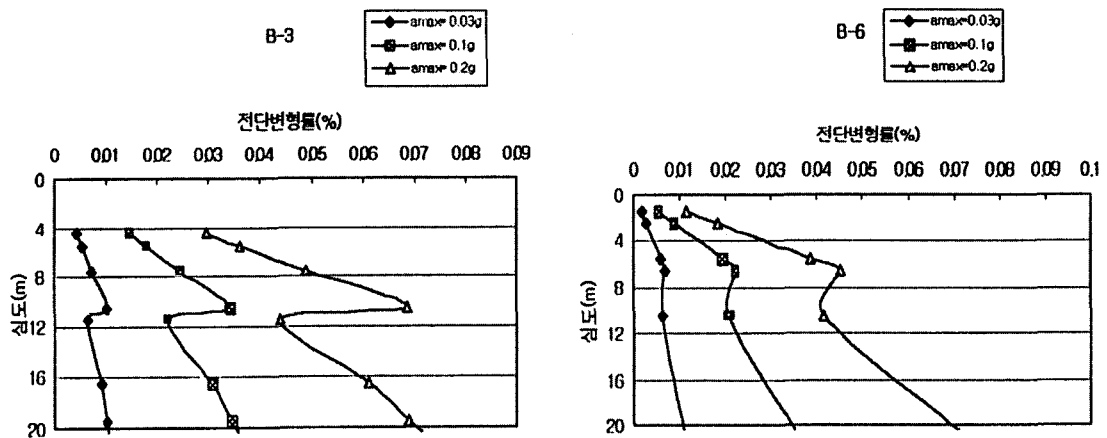


그림 26. Threshold strain에 의한 액상화 예측

법에 의한 결과는 심도에 따른 액상화 가능성의 경향은 비슷하지만, 보다 작은 안전율을 나타냈다. 그림 27(b)는 B-6 지역에서 반복삼축시험을 이용한 Seed와 Idriss(1971)의 방법과 B-4에서 Seed 등(1984)의 N값을 이용한 방법, Iwasaki와 Tatsuoka의 방법, Tokimatsu와 Yoshimi의 방법들로 마찬가지로 지진규모 $M = 7.5$, 지표면 최대가속도 $0.154g$ 로 액상화 가능성을 비교하였다. 역

시 그림 27(a)의 결과와 비슷한 경향이 나타나고 있다.

이러한 평가방법들은 심도별 액상화 가능성의 경향은 유사하게 나타났으나, 표준관입시험의 N값이 큰 심도 즉, 지반강도가 큰 심도에서 안전률에 있어 큰 차이를 보였으며, N값이 20이하의 심도에서는 비슷한 값을 갖는 것을 볼 수 있었다. 반복삼축시험을 이용한 방법은 다른 방법과

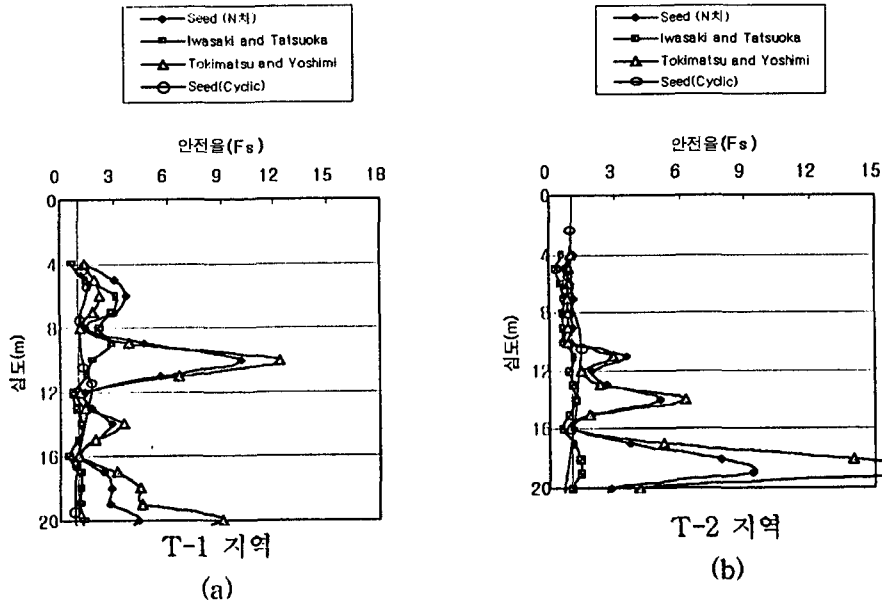


그림 27. T-1, T-2에서의 액상화 평가방법들의 결과 비교

유사한 취약심도를 보였지만, 현 장의 시료를 재 성형하여 실험을 실시한 교란의 영향과 상대밀도 가 큰 심도에서 실험시 성형의 문제점 등으로 작 은 안전률을 나타내고 있었다.

5.4 재성형 반복삼축시험의 교란의 효 과 평가

Seed 등(1984) 방법의 N값을 이용한 액상화 저항능력인 응력비와 cyclic triaxial test 통한 응력비를 심도별로 비교하므로써 시료 교란의 효 과를 파악하였다.

B-3은 반복삼축시험으로 액상화 저항력을 산 출했으며, B-1과 B-2는 N값을 이용하여 Seed 등 의 방법으로 세립자 함유량을 고려한 반복전단 응력비를 산정하였다. 그림 28(a)는 B-1과 B-2의 N값을 서로 비교하였으며, 그림 28(b)는 심도별 로 N값에 의한 B-1, B-2와 반복삼축시험을 통한 B-3의 반복전단응력비를 비교하였다. 이때 반복 삼축시험은 반복횟수 10회, 즉 지진규모 M=6.75

를 기준으로 했으므로 지진규모 M=7.5로 환산하 기 위해 실험에서 구한 응력비를 Seed 등의 환산 계수 1.13으로 나누어 주었다. 그림 28(b)에서 보 듯이 N값의 응력비보다 반복삼축시험의 응력비 가 다소 작게 나타났다.

하지만, 본 연구에서는 밀도가 큰 깨끗한 모래 와 마찬가지로 실트모래의 양진폭 10%를 사용 하였다. 그림 29에서도 반복삼축시험으로 구한 응력비가 N값으로 구한 응력비보다 작은 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 비록 현장의 K_v 상태의 압 밀조건이 아닌 등방압밀 과정을 거친 효과가 있 다고 하지만, 이것은 재성형 시료를 사용하여 지 반이 보유하고 있는 흙입자들의 분포형태 및 퇴 적구조, 2차압축에 의한 고결화 및 접촉부의 봉 합효과, 과압밀비, 응력이력, 이전 지진하중과 같 은 변형률 이력 등의 지반의 액상화 저항능력을 증가시키는 요인들이 제거되었다고 볼 수 있다. 특히, N값이 20이상의 심도에서 그 차이가 큰 교란의 효과와 시료 성형 시 문제점 등을 확연히 볼 수 있게 한다. 하지만, N값이 20이하에서는 N

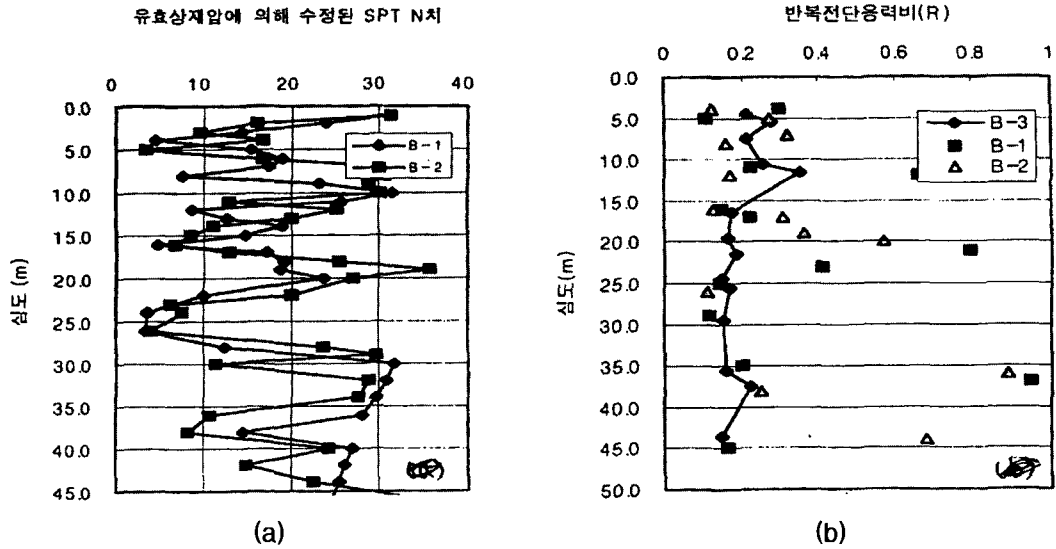


그림 28. N값에 의한 B-1, B-2와 cyclic triaxial test를 통한 B-3의 반복전단응력비의 비교

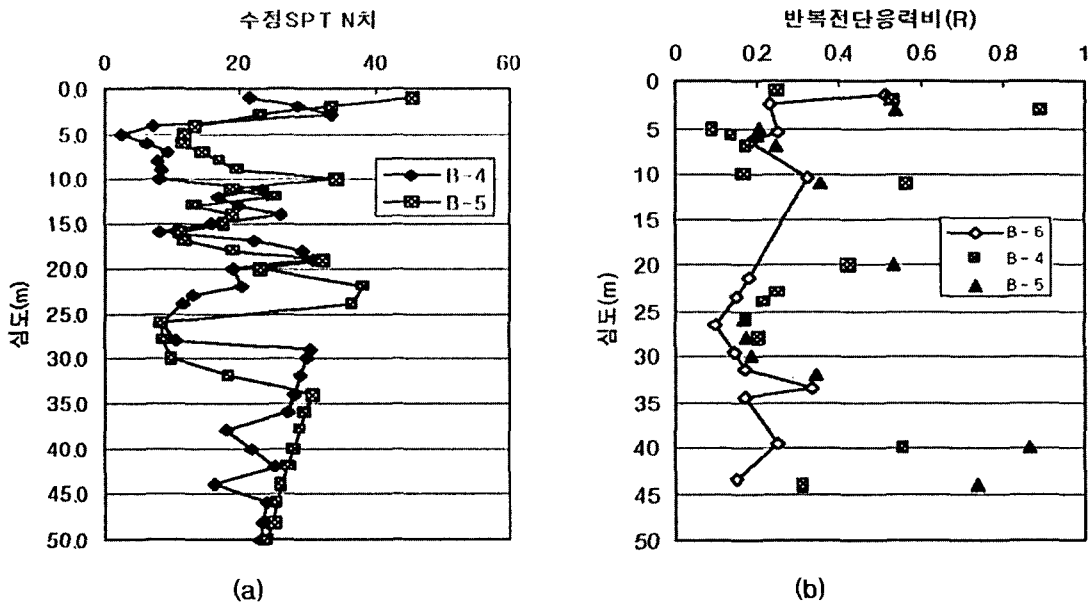


그림 29. N값에 의한 B-4, B-5와 cyclic triaxial test를 통한 B-6의 반복전단응력비의 비교

값으로 구한 저항능력과 반복재하실험으로 구한 저항능력과 큰 차이를 볼 수 없었다.

6. 결 론

본 연구는 서해안 현장 지반조사를 기초로 실

제 현장에서 지진과 같은 동적하중이 지반에 전달될 때 발생하는 지반의 거동을 예측하고자 반복삼축시험을 실시하여 샘플에 응력과 변형률의 거동을 살펴보았다. 또한, 여러 액상화 예측중 표준관입시험을 사용한 경험적인 방법과 교란시료

를 재성형한 반복삼축시험을 비교하여 교란의 영향을 살펴보았다. 이러한 실험결과를 정리하면

- 1) 평균입경이 0.15 mm이하의 실트질 모래의 반복삼축시험의 초기액상화는 양진폭 10%가 되는 시점과 유효구속압이 0으로 되는 시점에서 반복횟수가 거의 유사하게 나타났으며, 계속적인 반복하중으로 간극수압의 초기 상승은 선형적으로 증가하다가 시료의 유효응력이 거의 미약하게 남는 시점에서 갑작스러운 축변형과 간극수압도 큰 폭으로 증가되었다. 이러한 간극수압의 거동은 Seed, Martin, Lysmer 등이 1975년에 반복전단시험에서 제안한 식과 거의 유사한 거동을 나타내었다.
 - 2) 반복삼축시험과 경험적인 방법사이의 액상화 안전률과 저항능력들을 비교한 결과 반복삼축시험에서 교란된 시료의 재성형시 경험적 방법의 액상화 안전률과 저항능력들에서 액상화에 취약한 심도는 거의 유사하게 나타났으며, 이러한 취약심도는 N 값이 작은 심도와 거의 일치하였다.
 - 3) N 값이 20보다 작은 지역에서 경험적인 방법으로 구한 결과보다 반복삼축시험으로 나온 결과치들이 다소 작지만 비슷한 결과를 보였다. 하지만, N 값이 20 보다 큰 지역에서는 안전률과 저항능력면에서 매우 큰 차이를 보이고 있었다. 이러한 결과들은 재성형 시료를 사용하여 지반이 고유하게 갖고 있었던 흡입자들의 분포형태/ 퇴적구조, 장기간 유지된 압력 또는 지반구조의 2차 압축에 의한 고결화 및 접촉부의 봉합효과, 지진하중과 같은 이전 변형을 이력에 구조적 변화 및 정지토압계수의 변화 등 액상화 저항능력에 영향을 주는 인자들이 사라졌다는 것과 실험실에서 현장의 상대밀도 구현과 같은 시료성형상의 문제점 등을 알 수 있었다.
- 추후 연구과제는 이러한 실트지반에서 액상화

간편법과 지반의 동적 parameter를 사용하여 실시한 지진응답해석을 이용한 액상화 상세예측법을 비교 연구함으로써 간편법의 신뢰도 평가와 액상화 현상이후 지반의 거동분석이 차후 더 연구되어져야 할 사항들이다.

참 고 문 헌

1. Das, B. M. (1993), "Principles of Soil Dynamics", PWS-KENT publishing Co. pp. 397~455.
2. Port and Harbour Research Institute, "Handbook on Liquefaction of Reclaimed Land", A. A. Balkema (1997).
3. DeAlba, Pedro, Chan, C. K., and Seed, H. B. (1975), "Determination of Soil Liquefaction Characteristics by Large-scale Laboratory Tests", Report No. EERC 75-14, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, May.
4. Mulilis, J. P., Chan, C. K., and Seed, H. B. (1975), "The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sands", Report No. EERC 75-18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, July.
5. Seed, H. B., Martin, P. O., and Lysmer, J. (1975), "The Generation and Dissipation of Pore Water Pressure During Soil Liquefaction", Report No. EERC75-26, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
6. Seed, H. B. and Booker, J. R. (1977), "Stabilization of Potential Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT7, pp. 757~768.
7. Mori, Keni, Seed, H. B., and Chan C. K. (1977), "Influence of Sample Disturbance on Sand Response to Cyclic Loading", Earthquake Engineering Research Center.
8. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, Ignacio (1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", Journal of the Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 3, March.
9. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. (1984), "The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", Earthquake Engineering Research Center.
10. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1967), "Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake", Journal of

- Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, No. SM3, pp. 83~108.
11. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", J. SMFE, ASCE, Vol. 97, No. SM97, pp. 1249~1273.
 12. Seed, H.B.(1979), "Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes", J. GED, ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp. 201~255.
 13. Dobry, R. and Swiger, W. F. (1979), "Threshold Strain and Cyclic Behavior of Cohesionless Soils", Proc. Third ASCE /EMDE Specialty Conference, Austin, Texas, 17-19, September, pp. 521~525.
 14. Felix, Y. Y., Dobry, R., David, J. p., and Richard, S. L. (1980), "Liquefaction of Sands During Earthquakes the Cyclic Strain Approach", International Symposium on Soils under Cyclic and Transsient Loading.
 15. Dobry, R., Stoke, K. H., Land, R. S., and Youd, T. L. (1981), "Liquefaction for S-wave Velocity", Preprint 81~544, ASCE National Convention, St. Louis, Missouri.
 16. Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. (1983), "Empirical Correlation of Soil Liquefaction based on SPT N-value and Fines Content", Soil and Foundation, JSSMFE, Vol. 23, No. 4, pp. 56~74
 17. Iwasaki, T., Tatsulka, F., Tokida, K., and Yasuda, S. (1978), "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", Proceedings of 5th Japan Earthquake Engineering Syposium, pp.641~648.

(접수일자 1999. 3. 9)