

실트질 모래지반의 응력경로를 이용한 액상화 분석

Analysis of Liquefaction using Stress Path in Silty Sand Grounds

이 송¹⁾, Song Lee, 김태훈²⁾, Tae-Hwoon Kim, 이민호³⁾, Min-Ho Rhee

¹⁾서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

²⁾서울시립대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

³⁾서울시립대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

SYNOPSIS : It has been generally much fine contents in West Coast of Korea. When cyclic shear stress causing liquefaction was estimated as using cyclic triaxial tests in these grounds, it didn't appear linear relations between deviator stress and confining stress where σ'_3 was more than 150 kpa. Namely, due to no normalization of cyclic shear stress ratio, the errors of this is increased. Therefore, more confining stress is increased, more increment of deviator stress is decreased. So, using linear relations between $\tan\phi'_d$ of dynamic internal friction angle and CSR where σ'_3 was less than 150 kpa, liquefaction of these grounds was evaluated. Also, as doing detail evaluation which had carried response analysis of earthquake, this appeared good results which was well compatible with empirical methods using N-value of SPT. It was thought that these result evaluated vulnerable liquefaction area more correct than existing methods. Also, characteristics of liquefaction in West Coast grounds was compared with clean sands, with analysis of behavior of pore pressure ratio and axial strain affected by fine contents, as cyclic loading was applied.

Key words: Liquefaction, Cyclic shear stress ratio, Flow Line, Dynamic internal friction angle, Pore pressure ratio

1. 서론

최근 국외적인 대규모 지진이 빈번히 발생되면서 대형 재난이 국제적인 관심을 모으고 있다. 더불어 국내적으로 이러한 추세에 발맞추어 내진설계기준을 수립하고 여러 연구활동을 실시하고 있다. 이러한 분야 중 사질토 지반의 액상화 현상에 대한 여러 연구들이 진행되고 있다.

본 논문은 반복삼축시험을 통해 실트질 모래지반의 액상화 현상과 세립분 함유율에 따른 간극수압의 거동을 비교 고찰하였으며, 서해안 지역과 같이 세립분 함유율이 35% 이상의 심도를 갖는 지역에서 액상화 예측법의 문제점을 제시하여 수정 보완했다.

2. 지반조사 지역 및 액상화 예측법

2.1 지반조사 위치도

본 논문은 그림 1에서와 같이 B-3, B-6은 반복삼축시험을 실시했으며, B-1, B-2, B-4, B-5의 표준관입시험의 N값과 실내 토성 실험을 통한 흙분류 및 입도분포 자료를 이용했다. 또한, 탄성과 탐사와

그림 4와 같이 식 3을 이용한 p' - q diagram의 응력경로를 플롯한다. 그 이후 흐름변형이 발생할 때 Flow Line의 기울기 η 를 결정하여 동적내부마찰각 ϕ'_d 를 식 4를 통해 결정한다. 동일한 시료에서 반복 전단응력비의 변화에 따른 ϕ'_d 는 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있으며, 수축과 dilatancy의 경계지점인 Phase Transformation의 각 θ 도 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 Phase Transformation Line을 경계로 아래 부분은 수축현상이 발생하며, 위 부분은 dilatancy 현상이 발생한다.

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3, \quad q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (3)$$

$$\phi'_d = \sin^{-1} \left(\frac{3 \tan \eta}{6 + \tan \eta} \right) \quad (4)$$

실험실에서 동적내부마찰각으로 산정한 현장 전단응력은 식 5와 같다.

$$\tau_{field} = C_r \times \sigma'_o \times (A \cdot \tan \phi'_d + B) \quad (5)$$

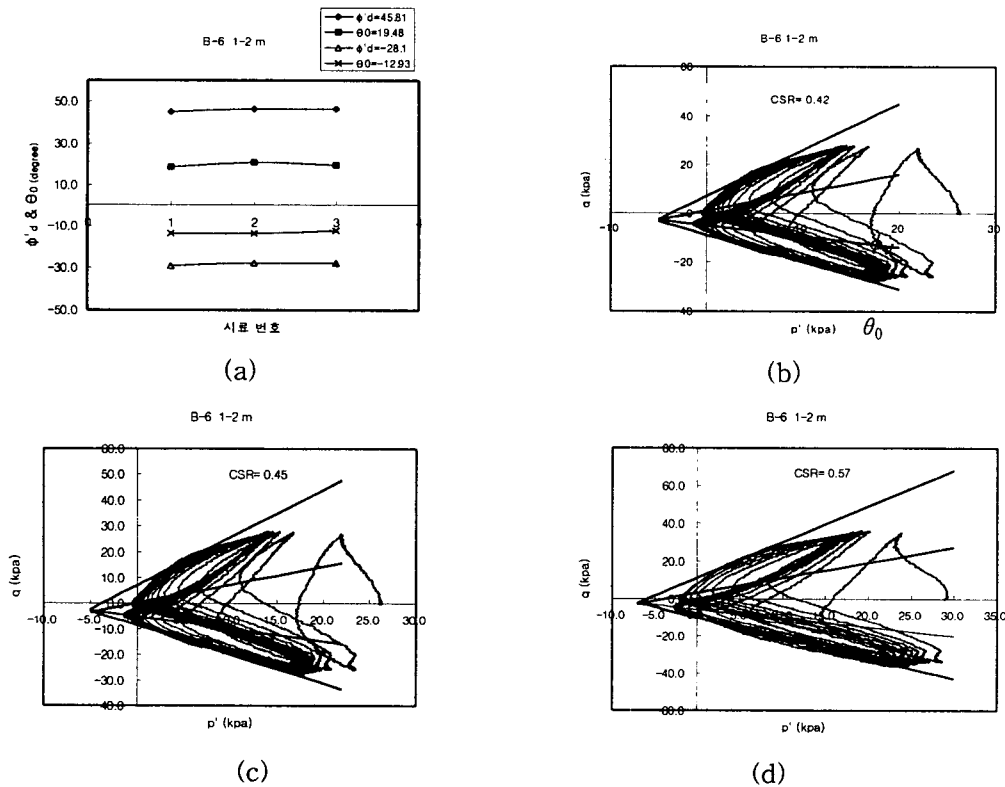


그림 4. B-6 1~2m 반복삼축시험의 응력경로

또한, 액상화 곡선으로 결정한 반복전단응력은 식 6과 같다. 지진규모별 등가반복회수가 결정이 되면, 그 때 액상화 곡선을 이용하여 심도별 반복전단응력비를 결정할 수 있다. 여기서는 초기 액상화 시점을 기준으로 플롯하였다.

$$CSR = \frac{\tau}{\sigma'_o} = \frac{\sigma'_d}{2\sigma'_o}$$

$$\tau_{field} = C_r \times CSR \times \sigma'_o \quad (6)$$

식 5와 식 6의 두 방법으로 동적내부마찰각과 액상화 곡선으로 전단응력을 산정했을 때, 1983년 Seed 등이 제안한 지진규모별 등가반복회수에 따라 식 7과 같은 선형적인 관계를 나타냈다.

$$CSR = A \cdot \tan \phi'_d + B \quad (7)$$

그림 6에서는 식 7과 같은 관계를 보여주고 있다. 즉, 반복전단응력비가 커질수록 $\tan \phi'_d$ 는 선형적으로 증가됨을 볼 수 있다.

B-3, B-6 의 실내 공진주시험의 자료를 이용하였다.

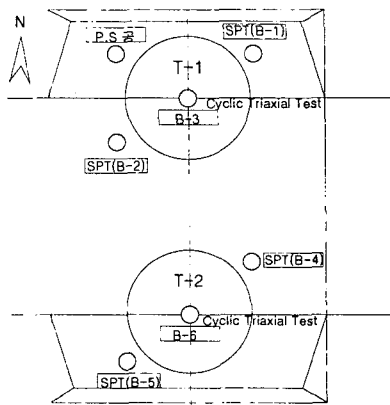


그림 1. 현장지반위치도

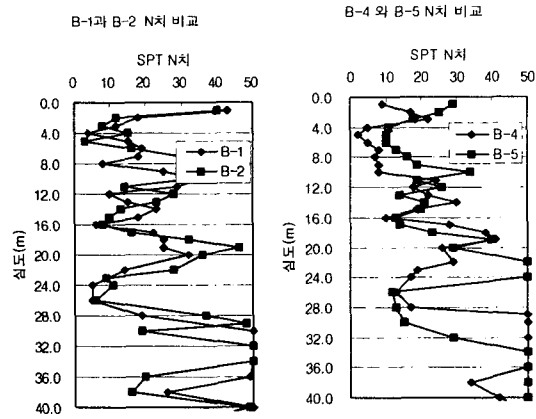


그림 2. 지반의 표준관압시험 N값

그림 2와 같이 현장 지역은 수평으로 퇴적된 지반으로서 B-1과 B-2, B-4과 B-5지역의 N값이 각각 유사한 것으로 나타나, 탱크 중간지역의 반복삼축시험과 양 끝단의 N값을 이용한 결과를 비교 분석하였다.

이 지반은 전반적으로 SM 또는 ML의 세립분 함량 35%를 초과하는 지층이 대부분이다.

2.2 액상화 예측법

본 논문에서는 1971년 Seed 와 Idriss의 반복삼축시험에 의한 예측법과 1984년 seed 등의 N값을 이용한 액상화 예측법을 비교 분석하였다. 먼저, 액상화 가능성을 입도분포와 N값으로 결정하여 액상화에 민감한 지역일 때 반복삼축시험을 통해 상세예측을 실시한다. 이에 지진응답분석이나 간이법으로 지진시 발생되는 지반의 전단응력비를 결정한 후, 반복삼축시험의 액상화 유발 응력비를 비교함으로써 액상화 안전률을 결정한다.

$$F_L = \frac{R_{field(modify)}}{L_{ave}} \quad (1)$$

반면, seed 등의 N값을 이용한 액상화 평가법은 과거 액상화 사례지반의 N값을 이용한 경험적인 방법으로서, Seed 와 Idriss의 방법과 유사한 절차를 행한다. 반복전단응력비 산출시 반복삼축시험이 아닌 N값으로 지반의 액상화 유발 전단응력비를 산정한다. 식 2에서 $(N_1)_{60}$ 은 수정된 N값의 해머 에너지 효율이 60%임을 의미한다. 본 논문에서는 도르래와 로프방식의 도우넛 해머를 이용한 SPT 시험의 에너지 효율을 45%로 보고 액상화 분석을 실시하였다.

$$(N_1)_{60} = N_1 \frac{ER}{60\%} \quad (2)$$

여기서, ER은 에너지 효율이며, 이렇게 결정된 $(N_1)_{60}$ 으로 그림 3의 세립분 함유율에 따른 반복전단응력비를 결정하게 된다.

3. $\tan \phi'_d$ 와 반복전단응력비의 상관관계

3.1 동적내부마찰각, ϕ'_d 의 결정

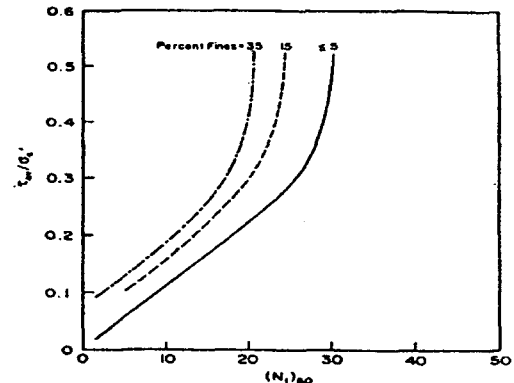


그림 3. 1984년 Seed 등이 제안한 M=7.5에서 액상화 유발 전단응력비와 $(N_1)_{60}$ 의 관계

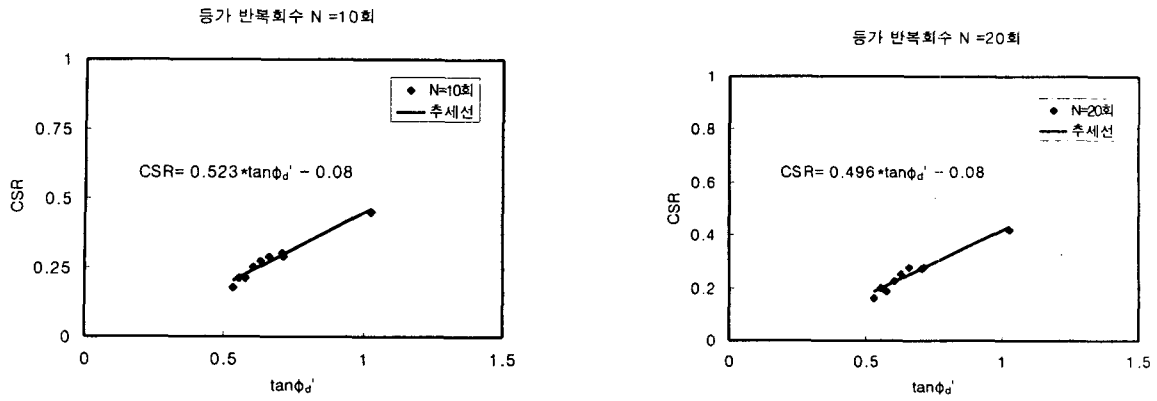


그림 5. 반복삼축시험을 이용한 반복전단응력비와 동적내부마찰각의 비교

따라서, 지진규모별 등가 반복회수가 증가할수록 그 기울기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 관계를 이용하여 동적 내부마찰각을 결정한 후 등가 반복회수별 식7의 계수 A, B를 결정하면 현장의 액상화 유발 전단응력을 산정할 수 있다. 결국, 등가반복회수가 증가하면 A계수는 점점 감소하게 된다.

그림 5는 계수 B=0로 가정하고 각각의 방법을 전단응력으로 플롯했을 때의 관계를 나타내고 있다. 이때 CSR과 $\tan \phi'_d$ 로 계산한 전단응력은 선형적인 관계를 나타내며, 또한 지진규모별 등가 반복회수가 증가할수록 계수 A가 작아지는 것을 볼 수 있다.

따라서, 지진규모별 등가반복회수를 결정한 후 응력경로를 이용한 동적 내부마찰각을 결정한다면, 해당 심도에 맞는 반복전단응력비와 전단응력을 결정할 수 있게 된다.

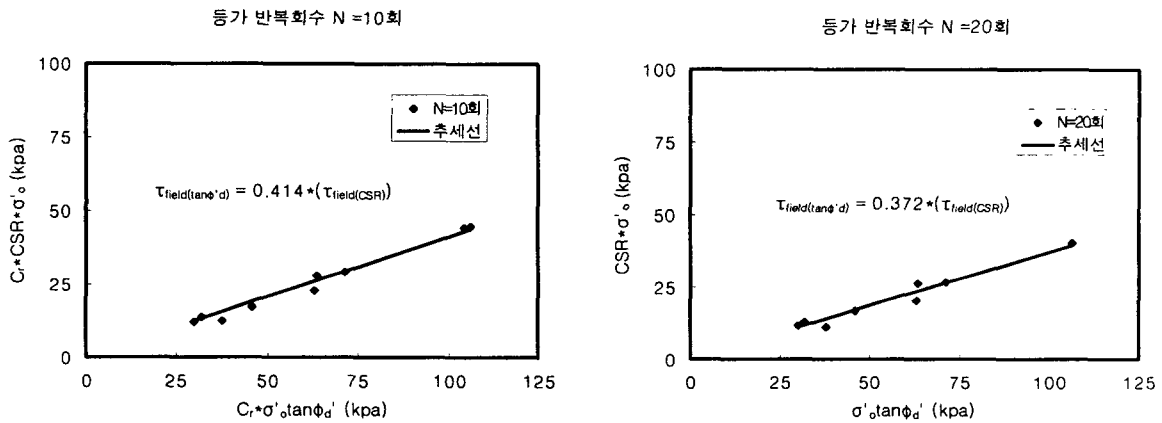


그림 6. 반복삼축시험의 반복전단응력비와 동적 내부마찰각으로 산정한 전단응력 비교

3.2 액상화 곡선을 이용한 반복전단응력비 결정시 문제점

상기에서 그림 5와 그림 6의 이러한 관계들은 10m 이하의(≒150kpa 이하) 심도에서 잘 맞으며 그 이상의 심도에서는 오차 정도가 점점 커지는 것을 볼 수 있었다. 이러한 요인은 다음과 같다.

일반적으로 반복전단응력비의 정규화 성립은 다음과 같은 조건이 이루어 질 때 성립하게 된다. 일정한 상대밀도와 반복회수가 주어진다면 초기 액상화에 대한 구속압과 최대 축차응력의 관계는 그림 7과 같이 선형적인 관계를 갖는다. 그러므로, 액상화 곡선에서 반복전단응력비를 $\sigma_d/2\sigma_c$ 로 정규화 시킬 수 있는 것이다. 하지만, 위의 관계는 깨끗한 모래의 경우이고, 세립분 함량이 35% 이상인 SM 또는 ML의 모래는 그림 8와 같이 선형적인 관계가 성립되지 않게 된다. 여기서, $Dr=50\%$ 이고 세립분 함유율 45%인 시료에 대해 초기액상화가 발생하는 반복회수 20회를 기준으로 유효구속압을 증가시키며, 축차응력의 영향을 살펴보았다.

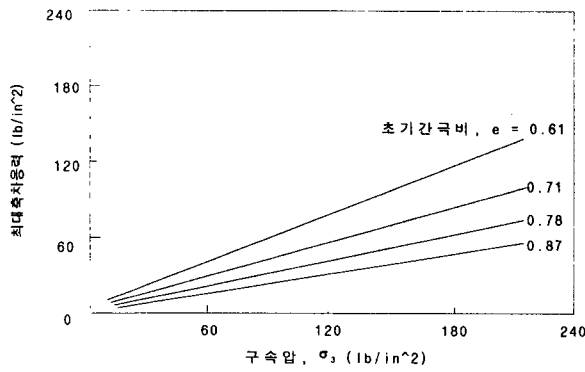


그림 7. 1967년 Lee와 Seed에 의한 N=100회에서 액상화시 최대축차응력의 영향

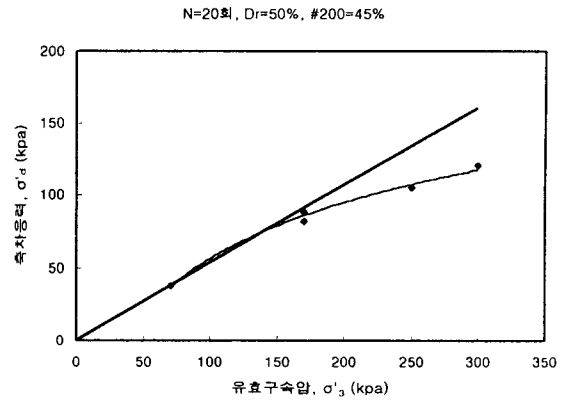


그림 8. N=20회에서 실트질 모래 액상화에 대한 축차응력의 영향

그 결과 유효구속압과 축차응력은 비선형적인 관계를 보이고 있었다. 따라서, 세립분 함유율이 35% 이상인 시료에서 유효구속압이 증가함에 따른 최대축차응력의 선형성이 이루어지지 않기 때문에, 심도 10m 이상에서 반복전단응력비의 정규화를 할 수 없게 된다. 결국, 이러한 결과를 무시하고 정규화를 했을 때, 그림 8과 같이 최대축차응력은 구속압 150kpa 이상으로 증가함에 따라 그 차이가 커지므로 반복전단응력비의 오차가 더욱 커지게 된다.

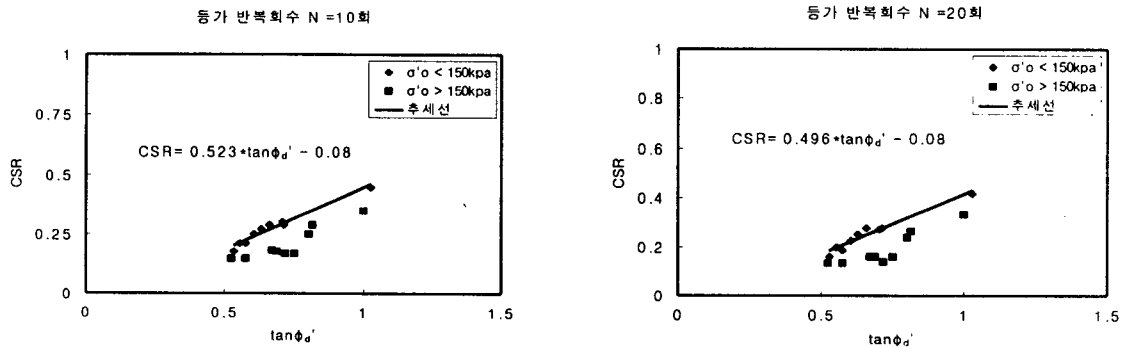


그림 9. 실트질 모래지반의 구속압의 영향

그림 9는 10m 이내의 구속압 150kpa 이하지역과 10m 이상의 심도는 갖는 구속압 150kpa 이상인 지역의 반복전단응력비와 동적내부마찰각을 비교하고 있다. 이 그림에서 등가반복회수 10회, 20회 각각에 대해 심도가 깊은 지역 즉, 구속압이 큰 지역의 반복전단응력비가 심도 10m 이하지역보다 작은 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 기존의 반복삼축시험시 시료내부에 발생되는 전단응력에 대한 구속압의 정규화가 세립분 함유율이 큰 지역에서 잘 맞지 않는다는 것을 보여준다. 구속압이 커짐에 따라 전단응력의 증가량이 작아지기 때문에 결국, 반복전단응력비가 작아지게 된다.

반복삼축시험에서 심도 40m 까지 이러한 구속압의 영향을 고려하지 않은 심도별 반복전단응력비를 그림 10에서 보여주고 있다. 여기서, 1984년 Seed 등의 N_{60} 값을 이용한 방법과 Seed 와 Idriss의 반복삼축시험 방법의 액상화 저항능력인 응력비를 비교하였다. 10m 이하 지역, 즉 구속압 150kpa 이하로서 반복삼축시험의 CSR이 N_{60} 값으로 산정한 값과 비슷 경향을 보이지만, 심도가 깊어짐에 따라 보다 낮은 응력비를 보이는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유로 10m 이전 층에서 식 7에서 제시된 $\tan \phi'_d$ 와 CSR의 관계 A, B계수를 결정한 후, 10m 이후 층에 대해 결정된 $\tan \phi'_d$ 로서 CSR을 그림 11과 같이 재산정하였다.

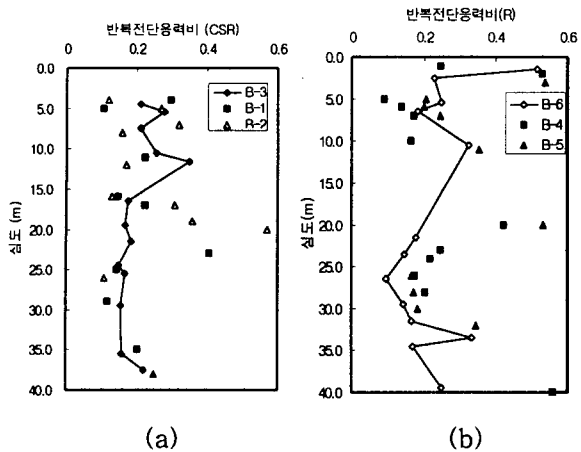


그림 10. M=7.5에서 N값과 반복삼축시험을 이용한 반복전단응력비의 비교

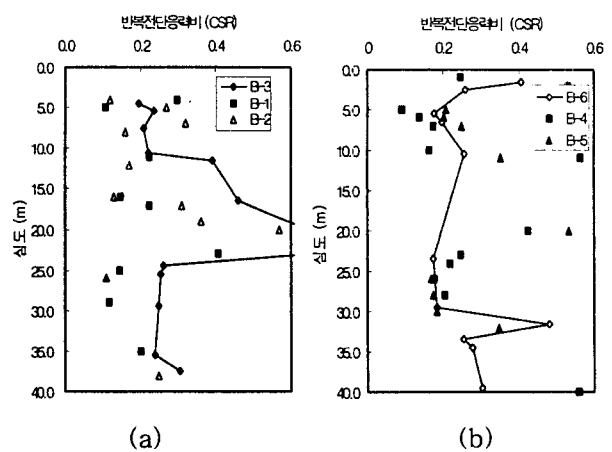


그림 11. M=7.5에서 심도별 동적내부마찰각과 N값으로 산정한 반복전단응력비의 비교

그림 11에서는 그림 10과 달리 심도 10m 이상인 지역에서 경험적인 방법인 N_{60} 값으로 산정한 액상화 저항능력보다 다소 크지만 유사한 경향을 보인다.

4. 액상화 분석 결과

4.1 지진응답분석 결과

지진응답분석을 위해 SHAKE91을 사용했으며, 지반가속도의 시간이력, 지반의 동적 특성치, 그리고 지반의 Profile을 입력하였다. 그림 12(a)는 지진응답분석을 통해 나온 심도별 최대가속도를 보여주고 있으며, 12(b)는 전단변형률을 1979년 Dobry 등이 제안한 방법과 비교한 결과를 보여주고 있다.

Dobry 등은 한계 반복전단변형률(Threshold cyclic shear strain)을 이용하여 지진동안 평탄한 지역에서 포화된 사질토 층의 액상화 가능성과 간극수압 상승을 평가하기 위해 식 8을 제안하였다.

$$\gamma_e = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v C_D}{G_{max} (G/G_{max})_{\gamma_e}} \quad (8)$$

여기서, C_D 는 감소계수로 1971년에 Seed 와 Idriss가 제안한 값이다. $(G/G_{max})_{\gamma_e}$ 는 한계전단변형률이 생길 때의 G/G_{max} 값이다. SHAKE91에서 기반암의 최대가속도가 약 0.11g이지만 지표면 최대가속도가 약 0.33g라는 것을 고려한다면, Dobry의 방법으로 산정한 변형률을 지표면 최대가속도 0.3g일 때 변형률로서 유사하다는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 12(c)에서 Seed의 간이법으로 산정한 지진에 의한 전단응력을 SHAKE91 결과와 비교한다면 SHAKE91로 산출한 결과가 더 큼을 볼 수 있다.

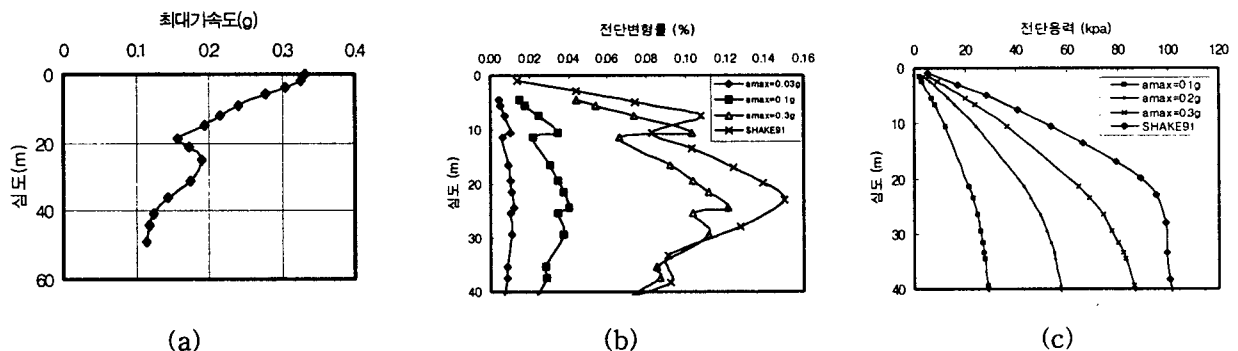


그림 12. B-3 지반의 전단응력과 변형률에 대한 지진응답분석과 간이법 비교

4.2 액상화 분석 결과

그림 13은 지진응답분석을 실시하여 지표면 최대가속도 0.33g인 지진시 발생하는 전단응력을 심도별로 산출한 결과와, 반복삼축시험에서 M=7.5일 때 액상화 곡선의 반복전단응력비로 계산한 액상화 유발 전단응력을 먼저 보여 주고 있다. 그 다음 동적내부마찰각을 이용하여 얻은 수정 전단응력을 보여주고 있다.

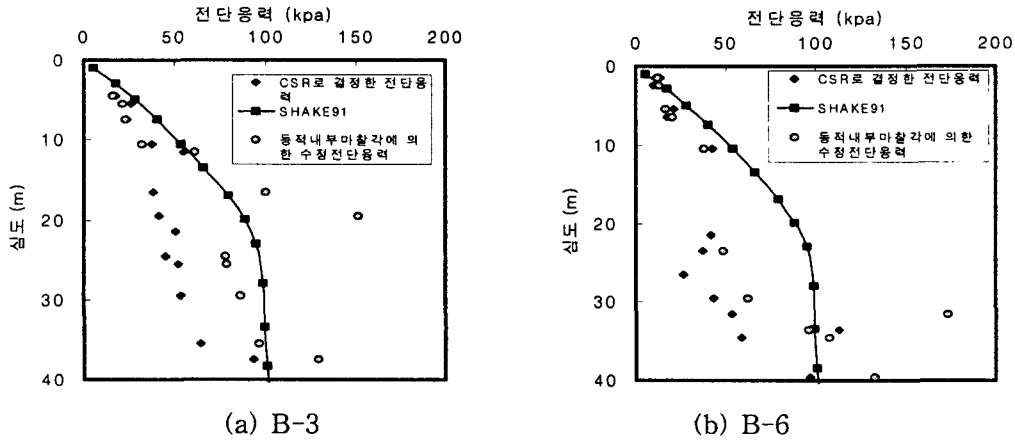


그림 13. 액상화 결과 비교

여기서, 동적내부마찰각을 이용하여 얻은 수정 전단응력이 10m 이상의 심도에서 더 크게 산출되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 깊은 심도에서 얻은 구속압에 영향을 받는 실트질 모래의 액상화 유발 전단응력을 보다 잘 보정해 주리라 판단된다.

5. 세립분 함유율에 따른 간극수압 및 축변형률의 거동 형태

반복회수에 따른 간극수압의 거동은 세립분 함유율에 따라 다른 거동을 나타낸다. 그림 14는 이러한 세립분 함유율이 다른 실트질 흙의 반복회수에 따른 과잉간극수압비, u_e/σ'_3 를 보여주고 있다. 여기서, 세립분 함유율이 높은 심도는 유효구속압이 0이 되는 초기 액상화 시점이 나타나지 않기 때문에 양진폭 10%되는 시점을 종료점으로 선택하였다. 세립분 함유율이 35%이하인 T-1 43~44m, 35~36m, 7~8m의 경우 반복회수에 따른 과잉간극수압비의 상승률은 초기 완만한 상승을 보이다 액상화 시점에서 갑작스러운 증가를 보이며, 유효구속압이 0으로 수렴하게 된다. 하지만, 세립분 함유율이 35% 이상인 T-1 21~22m, 37~38m, T-2 1~2m의 경우 초기 과잉간극수압이 크게 증가된 이후 완만한 상승을 보이며, 유효구속압이 완전히 0으로 수렴하지 않는다. 세립분 함유율이 증가될수록 반복전단응력비는 증가되어 액상화 저항 강도는 더욱 커지게 된다. 더불어, 과잉간극수압비 곡선은 그림 14와 같이 점차 위로 올라가게 된다. 따라서, 세립분 함유율은 반복 전단응력비와 간극수압비 곡선에 영향을 주게 된다.

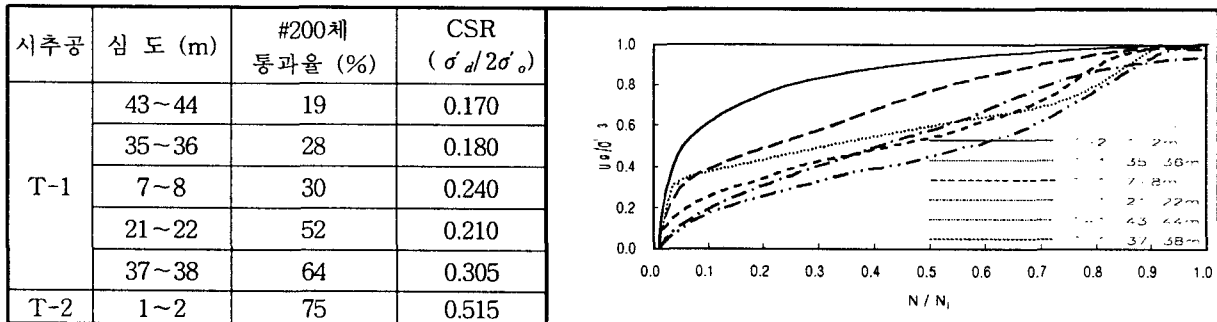


그림 15. 실트질 모래지반의 과잉간극수압비분포

또한, 세립분 함량의 영향이 변형률-반복회수 거동에도 영향을 줄 수 있다. 세립분 함량이 35% 이하의 경우 축차응력에 의해 작은 진폭을 가지고 일정한 주기적으로 변형을 유지하다 갑작스러운 큰 변형을 겪는다. 이 때 액상화 이전의 축변형률은 축차응력이 주 영향 인자로 축차응력이 클수록 회복할 수 있는 일시적인 축변형률이 커지게 되며, 액상화 이후에는 영구 변형을 겪게된다. 하지만, 세립분 함량이 35% 이상인 경우는 초기부터 큰 축변형률을 겪으며 점차적으로 축변형률이 증대하는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 세립분 함유율이 큰 서해안 실트질 모래지반의 액상화 유발 전단응력을 산정하는데 있어 발생하는 오차를 수정 제시하였으며, 이러한 결과를 지진응답분석을 실행한 결과로써 액상화 상세예측과 비교하였다. 더불어, 세립분 함유율에 따른 간극수압 상승비와 축변형률-반복회수의 경향을 살펴보았다.

(1) 세립분 함유율이 35% 이상인 실트질 모래지반에서는 150kpa 이상의 구속압하에서 압력이 증가할수록 축차응력의 증가량은 감소하는 비선형적인 경향을 나타내기 때문에 반복전단응력비의 정규화가 성립하지 않게 된다. 이에 구속응력이 약 150kpa 이하에서 동적내부마찰각에 의해 결정된 $\tan\phi'_d$ 와 액상화 곡선에 의해 결정된 반복전단응력비의 관계를 이용하여, 낮게 산정된 액상화 유발 전단응력을 수정 산출했다. 이것은 N값을 이용한 경험적인 방법의 결과와 잘 부합하고 있어 보다 정확한 액상화 예측이 이루어지리라 판단된다.

(2) 지진과 같은 동적 하중을 받는 지반에서 세립분 함유율이 증가할수록 반복 전단응력비가 증가되며, 간극수압비 곡선의 초기 기울기가 더욱 크게 상승하면서 수렴하는 형태를 띄게 된다. 또한, 세립분 함유율이 35% 이하일 때는 축변형률-반복회수의 거동이 초기 액상화로 말미암은 급격한 축변형률 증대 현상이 발생했지만, 세립분 함유율이 35% 이상으로 증대될 때 반복회수에 따른 축변형률이 점차적으로 증대되어 파괴되는 거동을 보였다. 특히 세립분 함유율이 75%일 때 파괴 양상은 초기 액상화에 의한 흐름파괴로 보기 어렵고, 동적하중에 의한 지반의 연화에 의한 파괴로 판단된다.

추후 연구과제로 액상화 후기에 발생하는 지표면 침하 해석과 지반구조물의 수평변위 문제에 대한 연구가 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 이송, 전제성, 김태훈(1999), “반복삼축시험에 의한 실트질 모래 지반의 액상화 특성 연구”, 한국지반공학회논문집 제 15권 제4호, pp.133~152.
2. BRAJA M.DAS(1993), “Principles of Soil Dynamics” PWSKENT Publishing Company, pp.87~180, pp.301~328, pp.369~458.
3. 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.
4. Jang, J.M., Shamoto, Y. and Tokimatsu, K.(1997), “Moving Critical and Phase-Transformation Stress State Lines of Saturated Sand During Undrained Cyclic Shear”, Soils and Foundation, Vol.37, No.2, pp51~59.
5. Seed, H.B. and Idriss I.M.(1967), “Analysis of Soil Liquefaction : Niigata Earthquake”, J.SMFD, ASCE, Vol. 93, No. SM6, pp83~108.
6. Seed, H.B., Idriss, I.M., Ignacio Arango.(1983), “Evaluation of Liquefaction Potential using Field Performance Data”, J.GED, ASCE, Vol.109, No.3, pp458~483.
7. Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.(1983), “Undrained Deformation Characteristics of Sand in Multi-directional Shear”, 1983, ASCE, Vol.23, No.1.