

액상화 방지를 위한 진동쇄석말뚝에 관한 기초적 연구 A Fundamental Study on Vibrated Crushed-stone Pile for the Improvement of Liquefaction Resistance

천병식*, 고용일**, 김백영***, 여유현****, 최현석****
Chun, Byung-Sik, Koh, Yong-Il, Kim, Baek-Yung, Yeoh, Yoo-Hyeon, Choi, Hyun-Seok

If a saturated sand is subjected to ground vibrations, it tends to compact and decrease in volume.; if drainage is unable to occur, the tendency to decrease in volume results in an increase in pore water pressure, and if the pore water pressure build up to the point at which it is equal to the overburden pressure, the effective stress becomes zero, the sand loses its strength completely. This phenomenon is called "Liquefaction". It is associated primarily, but not exclusively, with saturated cohesion soils.

The attention and study on liquefaction have been growing since the earthquake in Niigita, Japan, in 1964. Many researches on liquefaction effect have been carried out in many countries under the potential influence of earthquake including Japan. However, little research on liquefaction has been reported in Korea because Korea has been considered to be safe from earthquake. The term "liquefaction" is only known among geotechnical engineers.

In this paper, overview of liquefaction and the evaluation on the applicability of vibrated crushed-stone pile as a liquefaction prevention method are presented.

1. 서론

액상화(Liquefaction)란 지진 및 충격과 같은 동적외력의 작용에 의해 지반내에 간극수압이 상승하고 이로 인해 지반의 전단 저항력이 상실되어 액체와 같이 흐르는 현상을 말하며, 이 액상화는 점성토에서도 생기지만 주로 포화사질토층에 대하여 고려되고 있다.

액상화라는 용어가 본격적으로 쓰이게 된 것은 일본의 니이카타지진 이후(1964)로서 액상화에 대한 관심과 연구는 이 니이카타 지진이후 시작되었으며 그 후 十勝沖(togachioki) 지진(1968), 산페르난도지진(1971), 宮城縣沖(miyagikenoki) 지진(1978), 日本海中部 지진(1983), Loma Prieta 지진(1989), 필리핀지진(1990) 등에서 액상화에 의한 피해가 관찰되어 연구활동에 자극을 주는 커다란 계기가 되었다. 특히 일본의 경우는 지리적인 영향으로 인해 지진의 발생빈도가 높고, 또한 상대적으로 액상화를 일으키기 쉬운 지반조건으로 구성되어 있어 그동안 액상화 현상에 대한 활발한 연구가 이루어진 상태이다.

* 한양대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 초당대학교 토목공학과 조교수

*** 석정건설(주) 대표이사

**** 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, 학생회원

그러나 우리나라의 경우는 지진활동에 대해 대체적으로 안전지대라는 인식으로 인해 액상화에 대한 연구는 거의 전무한 상태로서 극히 최근까지 생소한 용어로 여겨져 왔으며, 지금도 지반공학을 전공하는 사람들에게만 알려져 있는 정도라고 할 수 있다.

특히 최근 우리나라에도 1978년 홍성지진, 1982년 사리원지진, 1996년 진도 약 4.0 이상의 경주, 영월지진 등 중소 규모의 지진발생으로 한반도에서도 예기치 못한 지진에 대한 대비책의 필요성이 부각되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 액상화에 대한 개략적인 이론적 고찰과 함께 액상화 방지대책으로서 진동쇄석말뚝 공법의 적용성을 기 연구자료를 통해 평가하고자 하였다.

2. 액상화에 대한 이론적 고찰

포화된 모래가 동적인 외력에 의하여 반복전단을 받아 액상화하는 경우 전단응력의 진폭, 반복횟수, 밀도 등이 액상화 발생의 중요한 요인이 된다.

니이카타 지진(1964년)이래의 연구에 의해 밝혀진 것 중 가장 중요한 것은 지진시 포화된 사질토의 액상화가 “비배수조건에서의 반복전단”으로 근사적으로 파악할 수 있다는 것이다. 이와 같은 고찰에 의해 그전에 단순히 진동현상이라고 생각했던 것과 비교해서 조건이 보다 명확하게 되어, 액상화 발생요건을 정량화하는 것이 용이하게 되었다고 말할 수 있다.

지진시의 반복전단응력에 대해서 고찰해 보면, 그림 1(a)에 있어서 수평지반 내 또는 대칭축상의 요소에서는 지진시 발생하기 전에는 수평단면은 주응력면이 되므로 수평 지진동에 의해 수평 단면상에 작용하는 동적 전단응력은 그림 1(b)와 같이 된다고 할 수 있으며, 평균적으로 보면 전단응력방향이 완전히 역전되게 된다. 한편 그림 1의 요소 B에서는 수평단면상에 전단응력 τ_0 가 상시 작용하고 있으므로 지진시의 전단응력은 그림 1(c)와 같이 전단응력은 불완전역전 혹은 비역전이 된다.

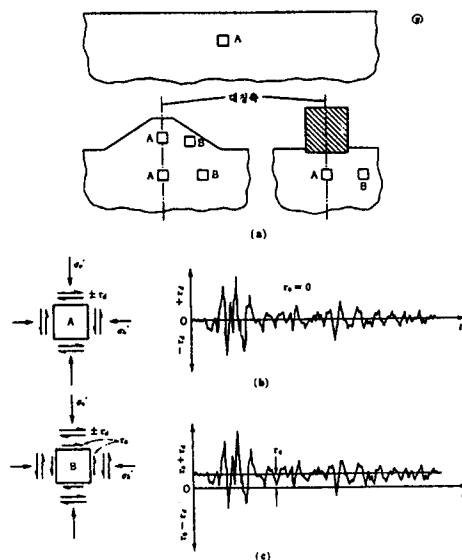


그림 1 지반내의 요소에 지진시에 가해지는 전단응력파형

지반이 반복응력을 받는 경우는 위에 기술한 것 이외에 교통하중, 기계기초, 또는 구조물에 대한 풍하중이나 파랑력에 의한 것을 생각할 수 있다. 이들의 경우는 반복하중의 주파수 및 지속시간, 전단응력의 역전의 정도 등이 지진하중의 경우와 다르지만, 본질적으로는 공통적인 문제로서 액상화발생의 원인이 될 수도 있으므로 검토가 필요하다.

반복전단에 의한 액상화의 mechanism을 논할 때 그림 1과 같은 불규칙파형이 아닌 규칙적인 파형을 적용하는 것이 이해하기 쉽다. 그림 2(a)는 단순화된 반복전단응력으로서 관성력방식에 의해 재하한 것이다. 시료는 느슨한 상태의 포화된 모래로서 비배수 조건하에서 과잉간극수압이 상승하는 형태를 그림 1(c)에서 나타내었다. 이 예에서는 반복응력을 6회 정도 가한 지점에서 전단 변형률 및 간극수압이 급증하고 있는데, 그 이전에는 전단변형율이 미소하며 간극수압은 서서히 상승하고 있다. 반 cycle마다 전단응력이 영으로 돌아감에도 불구하고 수압이 상승하고 있는데 이후 이것을 간극수압의 축적이라고 부르기도 한다.

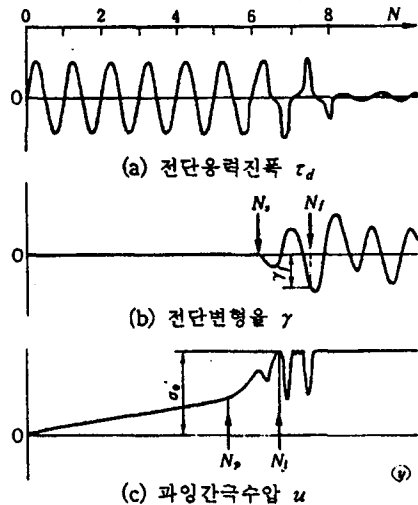


그림 2 느슨한 포화모래에 대한 비배수 반복전단시험 결과 예

반복횟수 N_s 의 지점에서 과잉간극수압 u 가 초기 유효응력 σ_0' 과 같아져 있는데 이것을 “간극수압비 100%의 상태”($u/\sigma_0' = 100\%$)라고 한다. 느슨한 모래에서는 N_s 의 부근에서의 전단변형율이 수%의 큰 값을 갖는 경우가 많다. 파괴를 변형률진폭에 의해 정의하는 경우에는 파괴변형률 γ_f 와 대응하는 반복횟수 N_f 가 “전단변형률 진폭 γ_f 까지의 반복횟수”가 된다. 그림 2의 N_p , N_s 는 각각 간극수압 급증점까지의 반복횟수, 전단변형률 급증점까지의 반복횟수를 나타내고 있다. 완전진폭 전단을 받고 있는 느슨한 모래의 경우에는 N_s , N_f , N_p , N_s 간의 차는 크지 않지만, 불완전진폭 또는 편진폭전단을 받는 경우 혹은 밀도가 높은 모래의 경우에는 이들간의 반복횟수가 상당한 차이를 보이므로 명확히 구별할 필요가 있다.

전단응력의 크기를 크게하면 보다 적은 횟수에서 액상화가 발생하고, 역으로 전단응력의 진폭을 작게하면 액상화까지의 반복횟수가 많아지는 것은 당연하다. 전단응력의 진폭을 다양하게 변화시켜 시행한 시험결과를 정리하면 그림 3과 같다.

그림 3(a)는 전단응력 진폭과 반복횟수(log scale)의 관계를 나타내고 있는데 금속재료의 피로 파괴에 있어서 이른바 S-N곡선과 매우 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 3(b)는 전단응력 진폭과 한 cycle당의 간극수압 상승량 $\Delta u_g=0$ 에 대응하는 전단응력 진폭이 피로한도에 해당하는 τ_{cr} [그림 3(a)]과 거의 같다는 것을 알 수 있다.

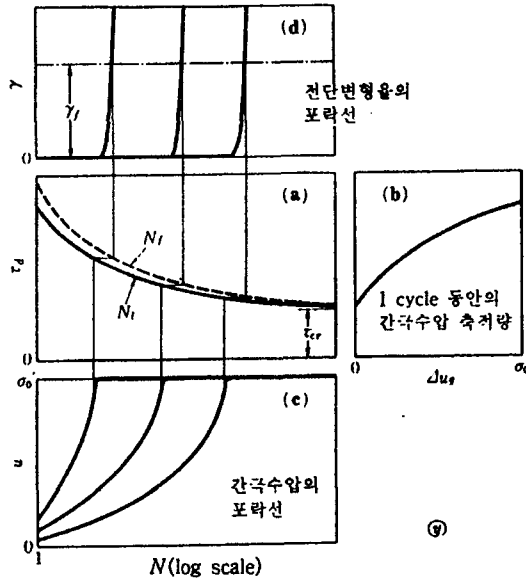


그림 3 느슨한 포화모래에 대한 비배수 반복전단시험의 전형적인 결과

반복전단 중의 간극수압 및 전단변형율은 각각 그림 2(c), (b)와 같이 변화하는데, 이들의 포락선을 나타내면 그림 3(c), (d)와 같다. 그림 3(c)에 있어서 $u = \sigma'_0$ 이 될 때까지의 횟수가 앞서 기술한 N_c 로서 그림 3(d)에 있어서 $\gamma = \gamma_f$ 가 되는 횟수가 N_f 이다.

3. 진동쇄석말뚝공법

액상화 방지를 위한 대책공법은 현재까지도 여러 연구가 진행중이며 대책공법의 개량효과 및 거동 mechanism에 대한 명확한 규명이 아직 정립되지 않은 상태로서, 대체로 다짐 등에 의한 지반개량, vibroflotation 공법, sand compaction pile, 배수공법 등을 들 수 있다.

진동쇄석말뚝은 배수공법의 일종으로서 모래지반 속에 쇄석기둥을 설치하고 수평방향의 배수경로를 단축함으로써 배수효과를 높여 포화 모래층 내에 지진시의 간극수압 상승을 경감하고자 하는 것이다.

진동쇄석말뚝은 형식적으로는 점성토의 preloading 공법시 압밀축진을 위한 sand drain과 유사하지만 액상화대책으로서 진동쇄석말뚝공법은 크게 두가지 면에서 sand drain과 다르다고 할 수 있다. 첫째는 진동쇄석말뚝공법은 preloading을 전제로 하지 않는다는 것이고 둘째, sand drain은 비교적 단기간 유효하면 되지만 진동쇄석말뚝은 강진에 대비하여 설치되므로 수년간 혹은 수

십년 간에 이르는 장기간 배수능력을 유지하여야만 한다는 점이다.

진동쇄석말뚝의 전형적인 배치 형태는 그림 4 와 같다.

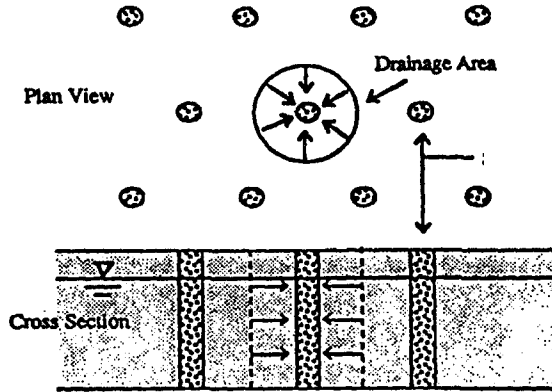


그림 4. 진동쇄석말뚝의 배치형태

3.1 진동쇄석말뚝공법의 설계

액상화 방지를 위한 진동쇄석말뚝의 설계법은 Seed and Booker(1977)에 의해 처음으로 소개되었는데 이 방법은 주변지반의 투수계수보다 말뚝의 투수계수가 최소 200배 이상이며 배수는 말뚝 중심으로의 방사방향 배수만을 고려하여 배수저항(drainage resistance)은 무시할 수 있다는 가정에 근거하고 있다. 그러나 실제로 배수는 말뚝내의 수직경로를 통해 이루어지면 따라서 Seed and Booker가 가정한 배수길이보다 길어지게 되고 결국 배수저항이 진동쇄석말뚝 설계의 중요한 인자가 된다.

이후 배수경로와 배수저항을 고려한 설계법이 Onoue(1988)에 의해 제시되었으며, Boulanger et al.(1998)은 상기 두가지 방법을 이용한 진동쇄석말뚝에 설계에 적용한 결과, 배수저항을 무시한다면 거의 유사한 결과를 나타낸다고 보고한 바 있다.

3.2 설계 파라메타

진동쇄석말뚝의 성능에 미치는 인자들은 여러 가지가 있으나 전단응력 진폭, 반복횟수, 가속도, 속도, 설치지반의 특성 등을 들 수 있다. 최근 미국에서 액상화의 줄이기 위한 설계법은 흙의 밀도에 대한 부분으로 접근하였을 뿐이며 진동쇄석말뚝을 drain으로서의 성능이나 재료강성은 설명되어 있지 않으며 이들의 효과는 부수적인 것으로만 보고 있다. 그러나 최근 일본에서는 진동쇄석말뚝을 지진 발생시 간극수압을 줄이는 목적으로 사용하고 있다.

대표적인 설계 파라메타에 대해서 간략하게 소개하면 다음과 같다.

(1) 흙의 밀도

반복하중하에서 간극수압은 조밀한 흙보다는 느슨한 흙에서 더 천천히 발생한다. 따라서 액상화의 가능성이 적다고 할 수 있으며 느슨한 모래의 경우 일단 초기액상화 상태에 도달하게 되면

지반의 침하가 크게 발생하게 된다. 그러나, 조밀한 모래의 경우 간극수압이 초기구속압과 같게 되는 과정에서 커다란 전단변형으로 인해 모래는 체적이 팽창하게 되고 비배수조건에서 전단변형율이 커지면 간극수압이 감소하고, 따라서 유효응력이 회복되게 된다.

(2) 투수계수

Saito et al. (1987)는 수많은 투수시험을 통하여 각각 크기가 다른 쇄석들을 동수경사의 함수로 나타내었다. 시험결과는 그림 5와 같다. 그림 4에 의하면 쇄석의 크기와 상관없이 동수경사가 증가할수록 투수계수는 감소한다는 것을 알수 있었으나 동수경사가 0.2이상 증가하여도 투수계수는 거의 변하지 않는다. 실험결과에 의하면 최대동수경사는 0.3이었고 액상화현상이 발생할때의 동수경사는 이값보다 크게 나타났다.

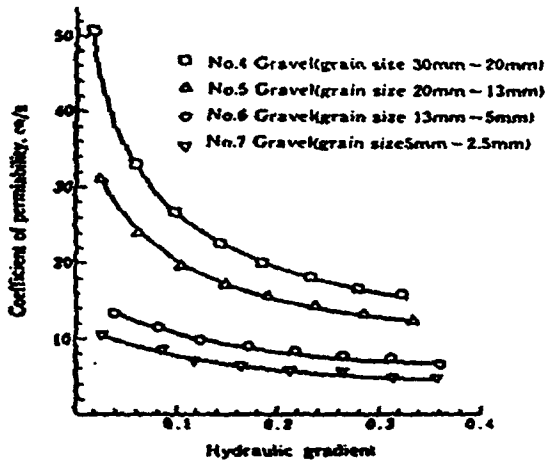


그림 5 투수계수와 동수경사와의 관계

(3) 재료(쇄석) 선택

진동쇄석말뚝의 재료를 선택함에 있어서 물의 유입이 자유로워 간극수압의 소산시키고 파이프를 방지할 수 있도록 해야한다.

Saito et al.은 쇄석재료를 선택하는 데 있어서 다른 식을 제안하였다. 실험자료에 기초하여, 쇄석말뚝과 주변지반의 입도분포에 기초한 공식을 제안하여 소요의 투수성을 확보하고 흙의 침식을 방지하고자 하였다.

$$20D_{s15} < D_{G15} < 9D_{s85s}$$

여기서 D_{s15} 는 흙의 15%통과율의 직경이고, D_{G15} 는 자갈의 15%통과율의 직경이다.

4. 결론

본 논문은 액상화에 대한 개략적인 이론적 고찰과 액상화 방지대책으로서의 진동쇄석말뚝 공법의 적용성을 기 연구자료를 통해 평가하고자 한 기초적 연구로서 연구결과를 요약 정리하면 다음

과 같다.

(1) 국내에서는 아직 액상화에 대한 인식과 연구가 미미한 상태로 최근 중소 규모의 지진 발생으로 인한 액상화 대비책에 대한 연구가 심도있게 이루어져야 할 것이다.

(2) 반복하중하에서 간극수압은 조밀한 흙보다는 느슨한 흙에서 더 천천히 발생하게 되며 따라서 액상화의 가능성이 적다고 할 수 있다. 느슨한 모래의 경우 일단 초기액상화 상태에 도달하게 되면 지반의 침하가 크게 발생하게 되므로 느슨한 흙의 조밀화는 액상화 발생 가능성을 최소화할 수 있는 인자라 할 수 있다.

(3) 액상화 방지대책으로서 진동쇄석말뚝공법을 적용할 경우, 정확한 배수경로와 배수저항을 고려한 설계법에 대한 연구가 필요하며 각종 설계 파라메타가 미치는 영향에 대한 평가 또한 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Saito A, et al. 1987. A countermeasure for sand liquefaction by gravel drains method. Nippon Kokan Technical Report No.51, Japan
2. Seed H.B. & J.R. Booker. 1976. Stabilization of Potentially liquefiable sand deposits using gravel drain systems. Report No. EERC 76-10, U.C. Berkeley.
3. Boulanger, R.W. and Hayden, R.F.(1995). "Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soils." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(12):844-855.
4. Onoue, A. (1998). "Diagrams Considering Well Resistance for Designing Spacing Ratio of Gravel Drains." Soils and Foundations, 29(4):135-136.
5. Seed H.B. and Booker, J.R. (1977). "Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains." Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT7):757-768