

진동대 시험을 이용한 쇄석다짐말뚝의 액상화 저감효과에 관한 연구 **Evaluation of Liquefaction Mitigation of RAP (Rammed Aggregate Piers) using Shaking Table Test**

김현정¹⁾, Hyun-Jung Kim, 배경태²⁾, Kyung-Tae Bae, 김지환³⁾, Ji-Hwan Kim, 조국환⁴⁾, Kook-Hwan Cho

¹⁾ 서울산업대학교 건설공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil Eng. Seoul National Univ. of Technology

²⁾ (주)대우건설 기술연구원 전임연구원, Researcher, DAEWOO Institute of Construction Technology, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.

³⁾ 서울산업대학교 건설공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil Eng. Seoul National Univ. of Technology

⁴⁾ 서울산업대학교 철도전문대학원 조교수, Assistant Professor, Graduate School of Railway, Seoul National Univ. of Technology

SYNOPSIS : Shaking table tests were performed to investigate the response of liquefaction mitigation of rammed aggregate piers(RAP) on soft ground. The displacements of the soft ground reinforced by RAP under area replacement ratio 7, 14, 28% during seismic loading were measured. The result of tests showed that effects of liquefaction mitigation were affected various area replacement ratios and ground acceleration on RAP systems.

Key words : Liquefaction, Mitigation, RAP(rammed aggregate piers), Shaking Table

1. 서 론

국토의 효율적인 이용계획에 따라 그동안 개발이 제한되어 왔던 해안 및 내륙의 연약지반 활용이 점차 증대되고 있다. 이러한 연약지반은 작은 규모의 지진에도 매우 취약하므로 현재 건축 구조물의 직접기초에 많이 활용되는 쇄석다짐말뚝(RAP, Rammed Aggregate Pier) 기술을 연약지반에서 지진으로부터 유발되는 액상화(liquefaction) 발생과 침하를 저감할 수 있는 기초 기술로 활용하기 위한 설계 및 적용기술의 개발이 요구된다. 쇄석다짐말뚝은 시공 시 타격에 의한 반복다짐으로 쇄석의 횡방향 응력을 증가시켜 액상화에 대한 주변 지반의 전단 저항력을 증가시키고, 배수를 용이하게 함으로써 지진발생 시 발생하는 간극수압의 소산을 촉진시켜 액상화 가능성을 조기에 저감시킬 수 있어 시공성 및 구조적 성능이 우수한 공법이다. 그러나 현장시험을 통한 액상화 평가가 사실상 불가능하므로 일반적으로 동적 수치해석과 반복삼축시험 등을 통하여 액상화 저감효과를 간접적으로 연구하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 현장 조건을 모사한 진동대 시험(shaking table test)을 통해 액상화 저감효과를 고찰하였다. 이를 위하여 지반가속도와 치환율 변화에 따른 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 원지반과 쇄석다짐말뚝 보강지반의 침하특성을 고찰하였다.

2. 진동대 시험

본 연구에서는 쇄석다짐말뚝의 액상화 저감효과를 고찰하기 위하여, 실물크기의 1/10 scale로 축소 조성된 말뚝에 대하여 입력가속도와 치환율에 변화를 주어 진동대 시험을 수행하였다. 본 시험은 수평방향의 1차원 진동을 일으킬 수 있는 진동대를 사용하였으며, 지진 하중은 각각 0.1, 0.2, 0.4g의 입력가속도를 구현하여 3Hz의 정현파로 15초 동안 진동을 재하 하였다. 시험에 사용된 토조는 152cm(가로)×50cm(세로)×70cm(높이)의 투명 아크릴판으로 제작하였으며, 토조 측면 마찰저항을 최소화하기 위해 스펀지를 토조 양옆에 설치하였다. 지진하중에 따른 말뚝과 지반의 침하특성을 고찰하기 위하여 가속도계를 토조 측면에 부착하고 말뚝과 지반의 상부에 각 1개씩의 LVDT를 설치하였다.

2.1. 지반 조건

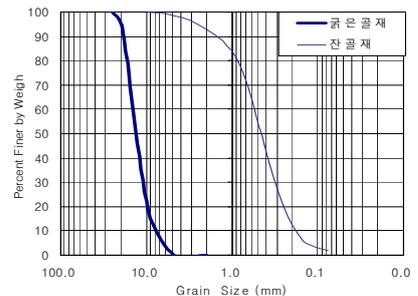
진동대 시험에 사용된 원지반 조성용 모래는 유효입경(D_{10}) 0.17mm, 평균입경(D_{50}) 0.48mm, 균등계수(C_u) 3.18 그리고 비중 2.56의 사질토이다. 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 $1.70t/m^2$, $1.44t/m^2$ 이며, 상대밀도 32%의 느슨한 지반을 조성하였다. 쇄석다짐말뚝 조성용 골재는 최대입경 25mm이하의 혼합골재를 사용하였으며, PVC관내에 래머로 층다짐하여 설치하였다. 시험에 사용된 모래와 쇄석골재의 사진과 입도분포곡선은 그림 2.1과 같다.



(a) 원지반 조성용 모래



(b) 말뚝 조성용 쇄석



(c) 입도분포곡선

그림 2.1. 진동대 시험에 사용된 모래와 쇄석골재

2.2. 복합지반 조성과정

현장에서 준설된 모래로 매립하여 지반을 조성하는 경우에는 젖은 모래를 살포하므로 본 시험에서는 일반적으로 사용하는 수중포설 방법의 원리를 이용하여 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 원지반을 조성하였다. 먼저 토조에 물을 약 50cm 높이로 채운 후 5mm 체를 수위에 맞추어 토조 내에 설치하였다. 이후 젖은 모래를 물속에서 가볍게 분산시켜 체 밑으로 낙하하여 원지반을 조성하였다. 이와 같이 형성된 모래의 상대밀도는 약 32%로 상당히 느슨하게 지반이 조성되었으며, 지반 조성 후 깊이별로 조사한 결과 상대밀도의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

한편, 쇄석다짐말뚝 복합지반의 조성과정은 다음 그림 2.2와 같다. 먼저 모형 쇄석다짐말뚝 케이싱(PVC관)을 각각 치환율 7, 14, 28%에 따라 말뚝 개수와 간격을 조절하여 설치하였다. PVC관의 자립을 위하여 관속에 쇄석을 5cm 가량 채워 넣고, PVC관내로 모래가 들어가는 것을 막기 위하여 비닐 캡으로 PVC관 상부를 막아놓았다. 그 후 원지반 조성방법과 같이 토조에 물을 약 50cm 높이로 채운 후 5mm 체를 이용하여 수중포설방법으로 주변지반을 형성하였다. 쇄석다짐말뚝은 조성은 PVC관을 10cm 가량 인발한 후 쇄석을 투입하고 래머를 이용하여 다지는 방법으로 각각 25회씩 3층으로 반복 다짐을 실시하여 다짐에너지를 현장 시공 시와 같이 $0.8MN/m^2$ 로 조절하였다. 치환율 7%인 경우의 복합지반 단면도는 그림 2.3과 같다.



(a) PVC관 설치



(b) 모래포설



(c) 계측기 설치



(d) 쇠석 다짐과정



(e) 복합지반 조성 완료



(f) 토조 측면

그림 2.2. 쇠석다짐말뚝 복합지반의 조성과정

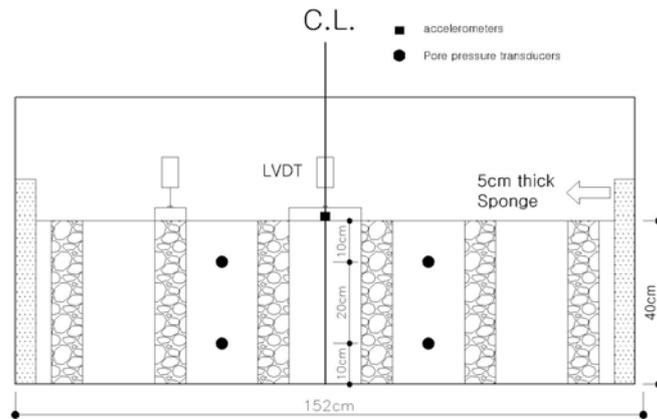


그림 2.3. 복합지반 단면도(치환율 7%)

2.3 시험조건

본 연구에서는 표 2.1과 같이 액상화가 일어나기 쉬운 비배수 포화 사질토 모형지반과 각각 치환율 7, 14, 28%의 쇠석다짐말뚝으로 보강한 복합지반을 성형하고, 우리나라의 내진설계기준에 적합한 지진파의 특성을 반영한 각각 지반가속도 0.1, 0.2, 0.4g 그리고 진동에 대한 주기는 3Hz에 대하여 15초간 지진하중을 재하 하여 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 쇠석다짐말뚝은 직경 7.6cm, 길이 40cm로 실물크기의 1/10 축소 모형을 사용하였다.

표 2.1. 진동대 시험조건

case	입력가속도 (g)	치환율	형상비	진동파형	주기
1	0.1	원지반	40cm/7.6cm (5.26)	정현파	3Hz
2		7%			
3		14%			
4		28%			
5	0.2	원지반			
6		7%			
7		14%			
8		28%			
9	0.4	원지반			
10		7%			
11		14%			
12		28%			

3. 시험결과 및 분석

진동대 시험 중 입력가속도와 실제 복합지반이 받는 지반가속도와의 차이를 고찰한 후, 지진하중 작용 시 지반가속도와 치환율 변화에 따른 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 원지반과 쇄석다짐말뚝 보강 지반의 침하특성을 고찰하여 액상화 저감효과를 고찰하였다.

3.1. 가속도 특성

지진하중 재하 시 입력가속도와 실제 복합지반이 받는 지반가속도와의 차이를 고찰하기 위하여, 진동대에 각각 0.1, 0.2, 0.4g의 입력가속도를 재하 하여 복합지반에 설치한 가속도계의 측정값과 비교하였다. 그림 3.1과 같이 입력가속도 0.1, 0.2g인 경우에는 입력가속도와 지반가속도의 차이가 별로 없었으나 입력가속도 0.4g인 경우 토조 측면에서 측정된 가속도는 진동 가압장치와 토조의 유격에 의해 지반가속도가 입력가속도보다 다소 크게 측정되었다.

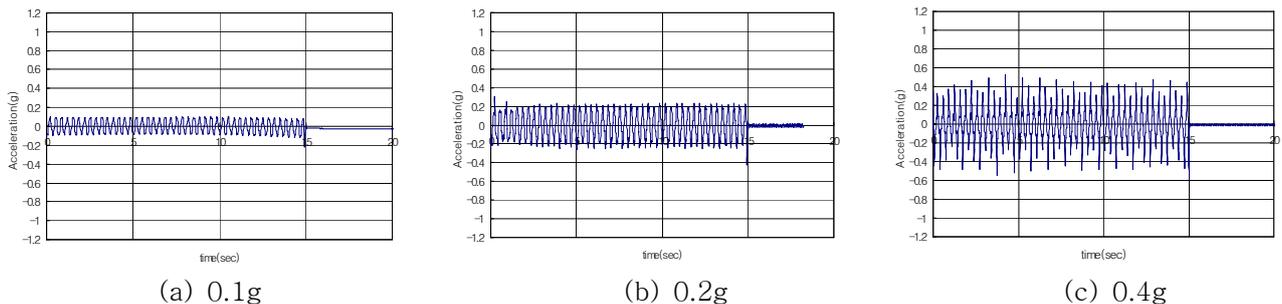


그림 3.1. 지진 지속시간에 따른 지반가속도

3.2. 쇄석다짐말뚝의 액상화 저감효과

지진하중 작용 시 지반가속도 증가에 따른 지반의 침하특성은 그림 3.2에서와 같이 가속도가 0.1, 0.2, 0.4g로 증가함에 따라 각각 최대 21, 35, 36mm로 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 침하에 도달하는 시간은 각각 15, 10, 2초로 지반가속도 증가에 따라 침하가 대부분 초기에 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 치환율 증가에 따른 지반의 침하는 그림 3.2(a)와 같이 지반가속도 0.1g인 경우 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 각각 최대 2.0, 0.2, 0.1mm로 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 쇄석다짐말

뚝으로 보강하지 않은 원지반에 비해 10배 이상 액상화 저감효과가 있는 것으로 판단된다. 그림 3.2(b)와 같이 지반가속도 0.2g인 경우에는 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 각각 최대 14, 13, 10mm로 원지반에 비해 각각 약 2.5, 2.7, 3.5배의 액상화 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 그림 3.2(c)와 같이 지반가속도 0.4g인 경우에는 치환율이 증가함에 따라 각각 최대 24, 17, 12mm로 가속도 0.1g와 0.2g에 비해서는 액상화 저감효과가 적었으나 원지반에 비해 각각 약 1.5, 2.1, 3.0배 침하가 감소함을 알 수 있었다. 또한, 치환율 28%인 경우에는 지진하중 초기에 지반의 부피가 팽창하는 dilatancy 현상이 발생하였는데 이는 치환율 증가로 인한 복합지반의 상대밀도 증가에 기인한 것으로 판단된다.

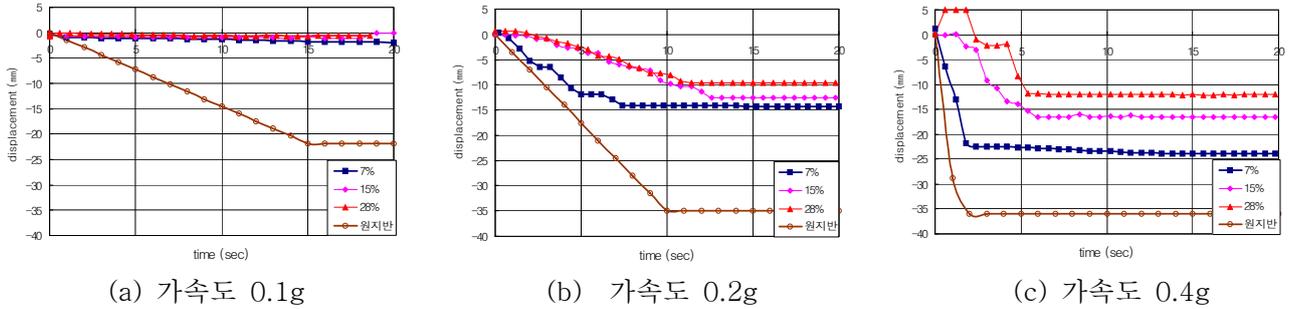


그림 3.2. 지반가속도와 치환율에 따른 지반의 침하특성

3.3. 말뚝과 주변지반의 침하특성

지진하중 작용 시 치환율 증가에 따른 쇄석다짐말뚝과 주변지반의 침하는 그림 3.3과 같이 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 말뚝의 경우 각각 최대 16, 14, 11mm로 지반의 경우 각각 최대 24, 17, 12mm로 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 최대 침하에 도달하는 시간은 각각 2, 6, 6초로 증가하여 치환율 증가가 침하량의 감소와 침하시간을 지연시키는 것으로 알 수 있다. 한편, 가속도 증가에 따른 말뚝과 지반의 침하는 그림 3.3(a)와 같이 치환율 7%인 경우 말뚝은 각각 최대 1, 8, 16mm, 지반은 각각 최대 2, 14, 24mm로 나타났으며, 그림 3.3(b)와 같이 치환율 14%인 경우에는 각각 최대 0.1, 7, 14mm, 지반은 각각 최대 0.2, 13, 17mm로 나타났고, 그림 3.3(c)와 같이 치환율 28%인 경우에는 각각 최대 0.1, 6, 11mm, 지반은 각각 최대 0.2, 9, 12mm로 나타나 가속도 증가와 침하의 상관성이 매우 큰 것으로 판단된다.

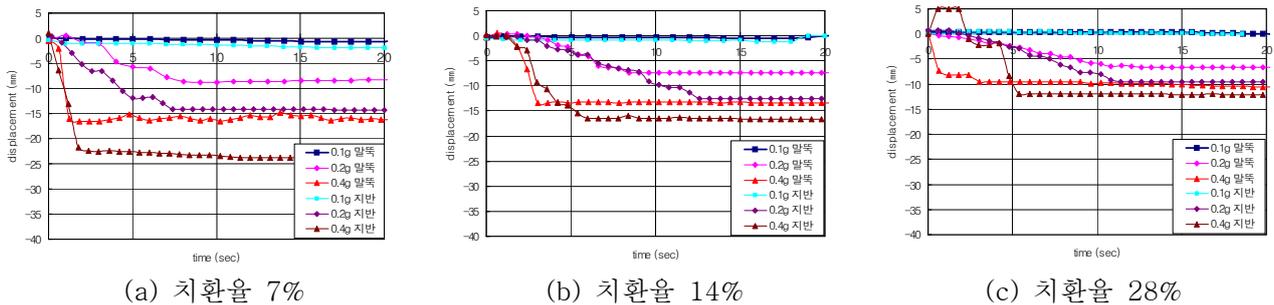


그림 3.3. 지반가속도와 치환율에 따른 말뚝과 주변지반의 침하특성

4. 결론

진동대 시험을 통해 지진하중 작용 시 지반가속도와 치환율 변화에 따른 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 원지반과 쇄석다짐말뚝 보강지반의 침하특성을 고찰하여 액상화 저감효과를 고찰하였다.

- (1) 지반가속도 증가에 따라 지반의 침하는 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 침하에 도달하는 시간은 대부분 초기에 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 치환율 증가에 따른 지반의 침하는 크게 감소하는 것으로 나타나 지반가속도 0.1g인 경우 쇄석다짐 말뚝으로 보강하지 않은 원지반에 비해 10배 이상 액상화 저감효과가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 고 치환율인 경우에는 지진하중 초기에 지반의 부피가 팽창하는 dilatancy 현상이 발생하였는데 이는 치환율 증가로 인한 복합지반의 상대밀도 증가에 기인한 것으로 판단된다.
- (4) 치환율 증가에 따른 쇄석다짐말뚝과 주변지반의 침하특성은 치환율 증가가 침하량의 감소 및 침하 시간을 지연시키는 것으로 알 수 있었다.

참고문헌

1. 안동석, 배경태, 박성완 (2008), “쇄석다짐말뚝에 의한 연약지반의 액상화 저감효과에 관한 연구”, *한국지반공학회 봄 학술발표회*, pp. 1030~1035.
2. 조종석, 황재익, 김명모, 한진태, 박영호 (2006), “액상화 지반에 근입된 말뚝의 파괴거동 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 제11호, pp. 123~131.
3. 하익수, 김명모 (2005), “1-g 진동대 시험을 이용한 포화된 모래지반의 재액상화 강도 특성 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권 제4호, pp. 65~70.
4. Fox, N. S. and Cowell, M, J. (1988), *GeopierTM Foundation and Soil Reinforcement Manual*, pp. 55~91.