

1g 진동대 실험을 이용한 지반-스톤칼럼의 상호작용 거동에 관한 연구

1g Shaking Table Test on Soil and Stone-column Interaction Behavior under Seismic Loading

김진만¹ Kim, Jin-Man

류정호² Ryu, Jeong-Ho

김미나³ Kim, Mi-Na

손수원⁴ Son, Su-Won

Abstract

The responses of stone column-improved ground under seismic loading are investigated using a series of 1g shaking table tests. These tests show similar results to those of one dimensional numerical models for stone column-improved ground based on Baez's assumption on the soil and stone-column interaction. The experimental and numerical results show that the stone column can prevent large shear deformations incurred due to cyclic softening in clayey deposits, but they also show that the surface acceleration in the improved clayey deposits may amplify more than that in unimproved clayey deposits when subjected to short periodic seismic motions.

요 지

스톤칼럼으로 개량된 연약점토지반의 내진성능을 평가하기 위해 1g 진동대 실험을 수행하였다. 실험결과 스톤칼럼으로 보강된 모형지반의 거동은 지반과 스톤칼럼의 상호작용에 관한 Baez의 가정을 기초로 구성된 1차원 수치모델과 유사한 결과를 보였다. 실험결과와 수치해석 결과에 따르면 스톤칼럼으로 보강된 연약점토지반은 반복 연화현상(Cyclic softening)등으로 발생하는 과도한 전단변형이 감소하는 경향을 보이지만 단주기 특성을 가지는 지진파가 스톤칼럼으로 개량된 지반에 가해지는 경우에는 개량지반의 증가된 강성으로 인해 개량되지 않은 지반에 비해 가속도가 크게 증가하는 현상이 발생할 수도 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Baez's assumption, Seismic loading, Shaking table, Site response, Stone column, Interaction

1. 서 론

스톤칼럼(Vibro-Stone Column)공법은 보편적으로 널리 사용하는 지반개량공법 중 하나이다. 스톤칼럼 공법

은 인공 및 자연사면의 안정, 지지력 증가, 침하속도 증진, 전체 및 부등침하 저감, 그리고 액상화 저감 공법으로 효과적임이 증명되었다(Greenwood, 1975; Seed and Booker, 1977; Goughnour and Bayuk, 1979; Balaam

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공 부교수 (Associate professor, Dept. of Civil Engineering, School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ.)

2 정회원, 부산대학교 토목공학과 박사수료 (Doctoral candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.)

3 비회원, 부산대학교 사회환경시스템 공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ.)

4 정회원, 부산대학교 사회환경시스템 공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 교신처: firesome@nate.com)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

zand Booker, 1981; Mitchell and Huber, 1985; Barksdale and Bachus, 1983; Iai, 1988; Onoue, 1988; Mitchell and Wentz, 1991; Baez, 1995; Baez and Martin, 1995; Goughnour and Pestana, 1998; Boulanger et al., 1998; Priebe, 1989, 1991).

스톤칼럼 공법은 느슨한 포화 사질토 지반에서 액상화 저감 공법으로 많이 사용된다. 이 공법은 다음과 같은 세 가지 메커니즘으로 액상화 가능성이 있는 지반의 내진성능을 향상 시킨다. 지반을 조밀한 상태로 변화시키고, 지진하중이 지반에 가해질 때 발생하는 과잉간극수압을 효과적으로 소산시키며, 지반강성을 증가시켜 보강효과를 통해 전체 지반응답을 변화시킨다(Goughnour and Pestana, 1998). 지진이 발생하면 전단파가 기반암으로부터 지반을 통해서 지표면으로 전파된다. 이 때 지진하중으로 인한 지반 운동은 반복 단순전단의 형태로 모사할 수 있다(그림 1). 지진에 대한 지반응답은 지반의 내진성능 평가에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. 스톤칼럼 공법은 인공 및 자연사면 안정, 지지력 증가, 침하 속도 증진, 전체 및 부등침하 저감, 그리고 액상화 저감 등에 효과적인 공법으로 증명되었다. 이와 관련하여, 스톤칼럼으로 개량된 지반이 있을 때, 스톤칼럼과 연약지반 사이의 전단변형률이 서로 같다는 가정(Baez, 1995)은 스톤칼럼으로 개량된 복합지반의 강성으로 전단응력의 재분배를 구하기 위한 이론적 접근방법이다. 이 가정은 복합지반의 전단응력은 그 재료의 전단강성과 비례한다는 것을 의미한다. 그리고 이 가정을 이용하여 지진하중을 받는 개량 또는 개량이전의 지반에 대한 동적 전단거동 뿐만 아니라 지반응답을 구하기 위해 수행하는 지반응답 해석과정을 단순화 시킬 수 있다. 한편 액상화

가능성이 있는 느슨한 사질토 지반과 달리 점토지반의 경우, 스톤칼럼 공법은 지지력 및 침하량 같은 고전적인 지반공학 문제에 대해서만 주로 연구가 되었고, 내진성능에 대한 연구사례가 드물기 때문에 이에 대한 많은 연구가 필요하다(Timothy et al., 2002).

본 연구에서는 내진성능에 대한 특별한 고려 없이 기본적인 설계와 시공과정을 거친 연약 점토지반 내 단독 스톤칼럼-연약지반의 상호작용과 지반응답 과정을 조사하였다. 본 연구를 위해 1g 진동대 실험과 수치해석이 수행되었고 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 1g 진동대 실험 프로그램

1g 진동대 실험에는 지반의 전단변위와 위상차를 억제하지 않는 연성토조의 하나인 Laminar shear box (LSB)가 사용되었고, 토조 안에는 계측장치가 포함된 연약점토 모형지반이 조성되었다(김진만, 2010).

2.1 실험시설 및 장비

1g 진동대 실험에는 폭과 길이가 각각 5m인 3자유도 진동대가 사용되었다. Laminar shear box는 40층이 표준으로 폭 1.2m, 길이 2m, 그리고 높이 1.8m로 제작되었으며 이번 실험에서는 0.67m의 높이(15층)까지만 사용하였다(그림 2).

2.2 계측 계획

연약점토 지반과 스톤칼럼의 동적 상호작용 규명을

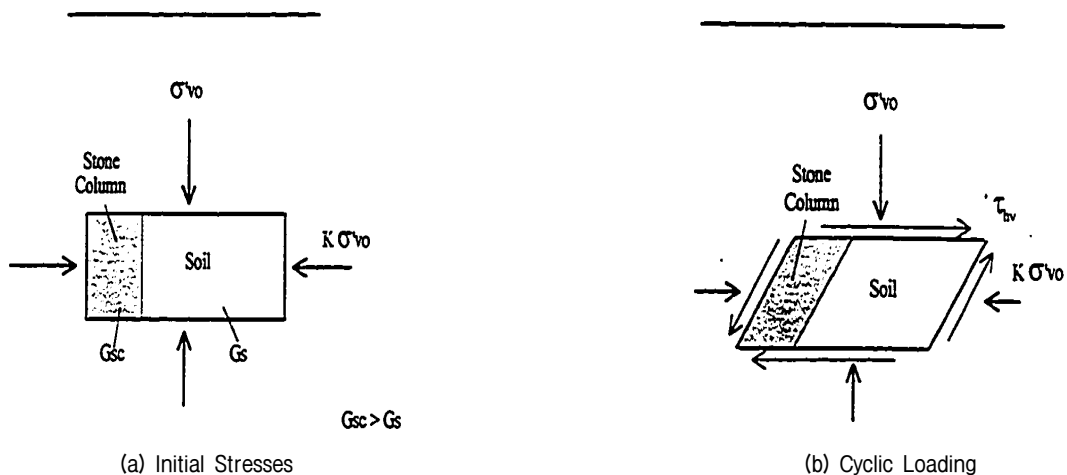


그림 1. 복합지반 내 전단응력의 재분배(Baez, 1995)

위해 총 12개의 가속도계, 6개의 간극수압계, 그리고 3개의 LVDT를 이용하여 계측을 수행하였다. 가속도계 배치는 토조의 경계효과를 조사하기 위해 가속도계 3개를 한 열로 구성하여 모형지반 중심에 2열, 중심에서 600mm 와 800mm 간격으로 각 1열씩 총 4열을 설치하였다. 실험에서 설치한 간극수압계는 다른 연구 주제로 분석이 진행 중이며 본 논문에서는 그 결과를 소개하지 않았다. 3개의 LVDT는 토조의 내부변위와 외부변위를 비교할 목적으로 토조 외부에 설치되었다(그림 3).

2.3 모형지반 조성

계측기를 설치한 후 토조 안에 점토를 채워 모형지반을 조성하였다(표 1). 모형지반은 실험내용에 따라 개량

전 지반과 개량 지반으로 조성하였으며, 개량 지반은 실제 시공순서에 따라 스톤칼럼을 모형지반에 설치하였다(그림 4).

2.4 모형실험 수행

개량 전·후의 모형지반에 대해 7단계의 1g 진동대 실험을 수행하였다(표 2). 모형실험에는 장주기 특성을 가진 Hachinohe 지진파와 단주기 특성을 보이는 Ofunato

표 1. 모형 지반의 공학적 특성

USCS	G_s	LL(%)	PI(%)	S_u
CL	2.6	56	21	4~6kPa

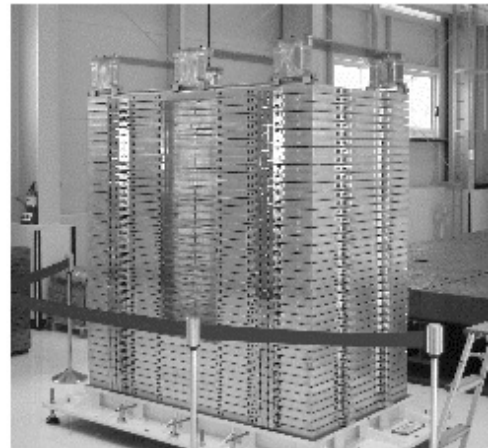
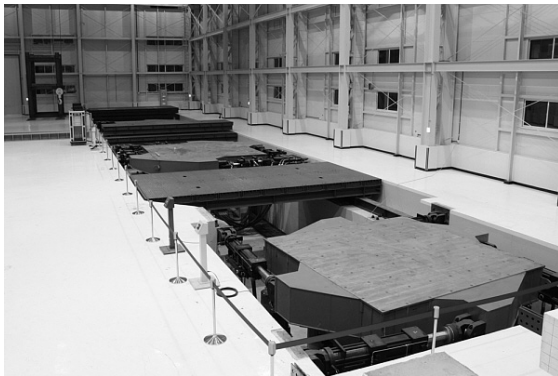


그림 2. 1g 진동대 실험시설 및 Laminar shear box(부산대학교)

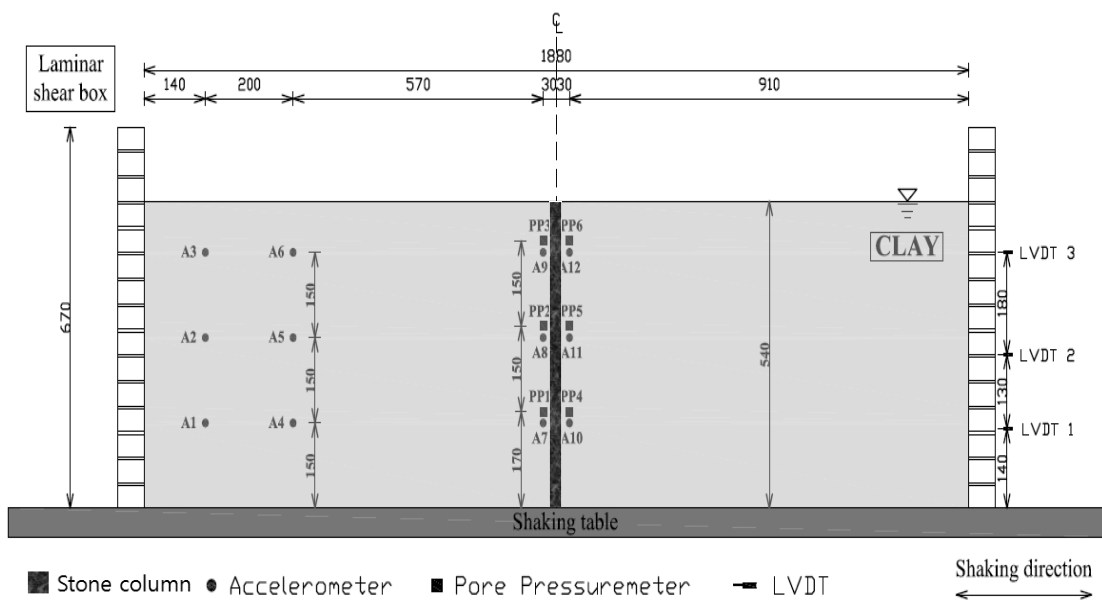


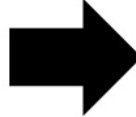
그림 3. 모형지반 내 계측기 위치도

표 2. 개량 전과 개량 지반에 대한 모형실험 프로그램

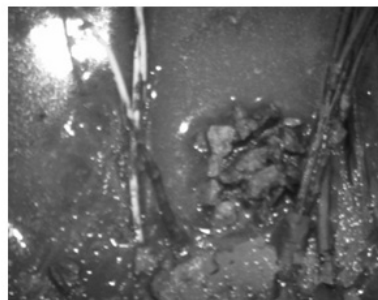
Test ID	실험 형태	파 형상	$A_{max}(g)$	주파수(Hz)	서술
FF 1.1	지반조사	-	-	-	휴대용 콘 관입시험
FF 1.2	측정, V_s	충격파	-	-	해머 충격 시험
FF 1.3	사인 스윙	사인곡선	0.05	1 ~ 40	사인 스윙 시험
FF 1.4	스펙트럼	사인곡선	0.05	4.8	사인곡선 시험(주기 횡수=10)
FF 1.5	스펙트럼		0.05		사인곡선 시험(주기 횡수=20)
FF 1.6	스펙트럼		0.05		사인곡선 시험(주기 횡수=50)
FF 1.7	스펙트럼		0.05		사인곡선 시험(주기 횡수=100)
FF 1.8	지진파	Hachinohe	0.05	0.375	지진모사(Hachinohe)
FF 1.9	지진파		0.05		
FF 1.10	지진파	Ofunato	0.05	4.8	지진모사(Ofunato)
FF 1.11	지진파		0.05		
FF 1.12	측정, V_s	충격파	-	-	해머 충격 시험, V_s
FF 1.13	지반조사	-	-	-	휴대용 콘 관입시험



(a) 지반 관입 후 플러싱 처리



(b) 공동생성 후 쇄석 투입 및 다짐



(c) 스톤칼럼 설치 완료

그림 4. 모형지반 내 스톤칼럼 설치 과정

지진파를 사용하였다. 이 지진파들의 지반운동 특성 (Kramer, 1996)은 표 3과 그림 5와 같다.

3. 실험결과 및 분석

1g 진동대 실험 결과를 시간 및 주파수 영역 그리고 응답스펙트럼을 통해 분석하였다. 가속도, 속도, 변위,

그리고 전단변형률 응답에 대해 분석하였고, 데이터는 필터링이나 기선 보정(baseline correction)기법을 통해 신호를 보정하였다.

3.1 지진 하중에 대한 지반응답

매우 큰 규모의 지진에서는 흙의 비선형성과 강성저

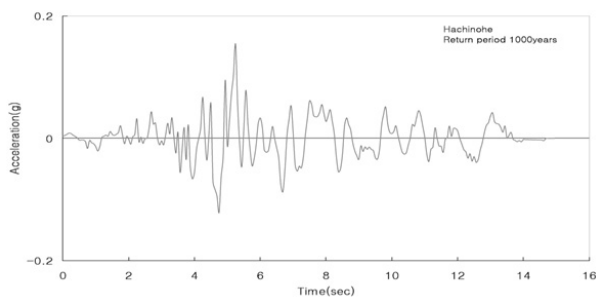
하로 인해 지표면의 가속도 운동이 약해지는 경우가 있지만 일반적으로는 지진이 일어났을 때 연약 점토지반의 지반진동은 증가하는 것으로 알려져 있다(Idriss, 1990). 하지만 매우 큰 수준의 지진하중을 받는 연약점

토지반은 가속도 감쇠가 일어나더라도 지반의 비선형거동과 강성저하로 인해 전단파괴를 일으킬 수도 있다. 이번 모형실험을 통해 연약점토지반의 이와 같은 증폭특성을 분석하였다. 그림 6과 7은 모형지반 지표면의 가속도, 속도, 그리고 변위 응답을 보여주고 있다.

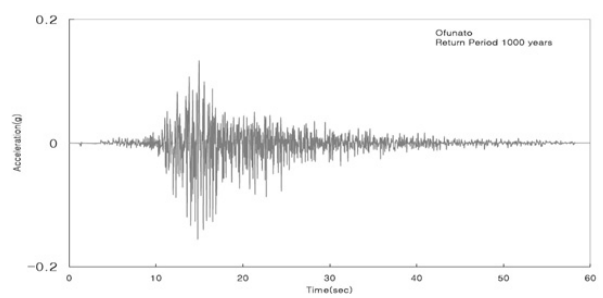
그림 6은 Hachinohe 지진파가 적용된 개량 전 지반 및 개량 지반의 동적응답을 보여주고 있다. 결과에 따르면, 개량 지반에서의 가속도, 속도, 그리고 변위응답의 최대값은 개량전 지반의 그것보다 각각 18%, 34%, 그리고 37% 감쇠되었다. 그러나 Ofunato 지진파가 적용된 실험결과는 장주기특성 지진파가 적용된 실험결과와 매

표 3. 입력 지진파의 특성

	Hachinohe	Ofunato
최대 수평 가속도(g)	0.154	0.154
평균평방근(g)	0.0398	0.0334
탁월주기(sec)	0.36	0.255
지속시간(sec)	6.3	13.1



(a) Hachinohe 지진파



(b) Ofunato 지진파

그림 5. 입력 지진파의 특성

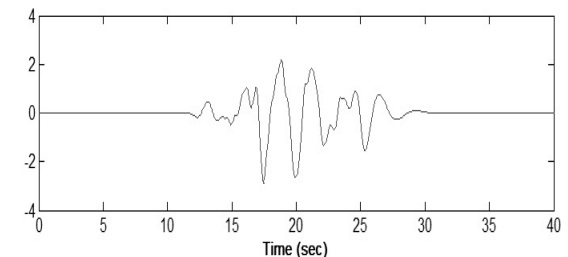
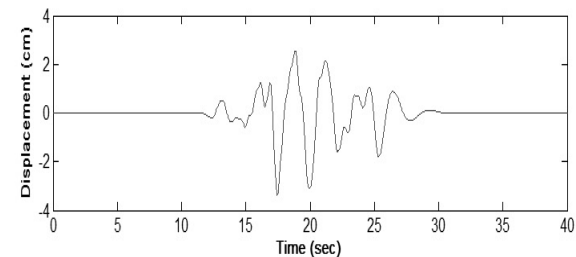
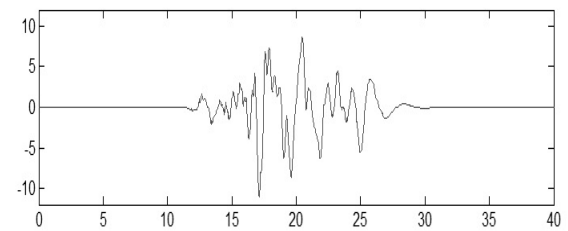
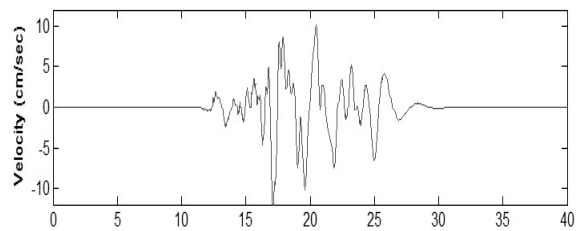
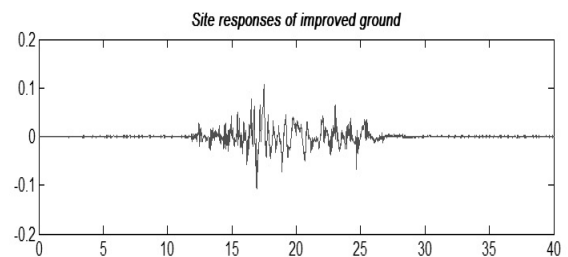
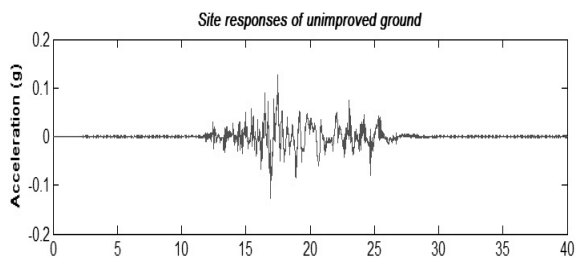


그림 6. Hachinohe 파에 대한 모형지반의 가속도, 속도, 변위 응답

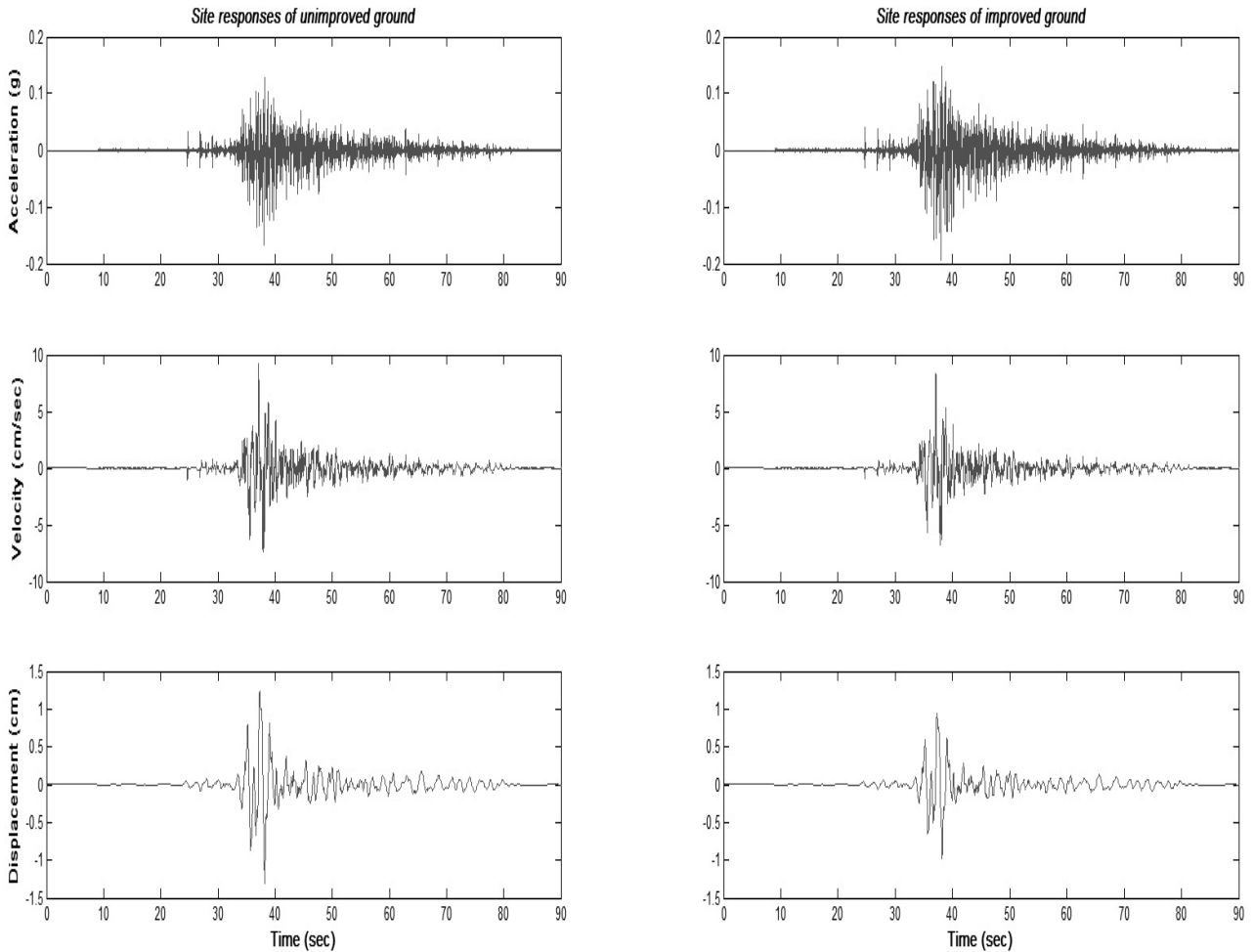


그림 7. Ofunato 파에 대한 모형지반의 가속도, 속도, 변위 응답

우 다른 경향을 보였다(그림 7). 그림 7은 지표면의 가속도, 속도, 그리고 변위응답을 보여주고 있다. Ofunato 지진파는 Hachinohe 지진파에 비해 상대적으로 단주기 특성을 가지고 있어 개량지반의 가속도 응답의 최대값이 원지반보다 35% 증가된 것이 관찰되었다. 개량지반의 가속도 응답 이외에 속도와 변위 같은 지반응답의 최대값은 원지반 보다 각각 37, 39% 감소된 것을 확인할 수 있었다.

본 실험결과를 통해 스톤칼럼으로 개량된 지반은 지표면에서의 속도와 변위응답이 개량전 지반의 그것보다 억제되는 경향이 있으나 지진파의 주기 특성에 따라 지표면의 가속도 응답이 현저히 변화 될 수도 있다는 것을 확인하였다.

3.2 가속도 응답 스펙트럼

그림 8과 9는 입력 지진파들에 대한 모형지반의 지표

면 가속도 응답 스펙트럼들을 보여주고 있다.

그림 8은 개량 전 지반과 개량 지반의 최대 스펙트럼 가속도에 상응하는 주기가 다소 다르다는 것을 보여주고 있다. 개량 전 지반과 개량 지반에서는 각각 0.1~0.3초, 0.04~0.05초의 주기를 보이고 있다. 이 결과는 스톤칼럼으로 원지반이 개량됨으로 인해 지반 전체의 강성이 증가되어 개량 지반의 고유진동수가 높아지는 것을 보여준다. 그리고 개량된 지반의 증가된 고유진동수로 인해 지반전체의 진동특성이 개량 전 지반에 비해 단주기 특성으로 이동된 것으로 판단된다. 그림 9는 Ofunato 지진파에 대한 모형지반의 지표면 가속도 응답 스펙트럼을 보여주고 있다. 개량 지반과 개량 전 지반의 응답 스펙트럼들은 유사한 경향을 보이는 것 같으나, 개량 지반의 응답 스펙트럼 가속도 크기가 개량 전 지반의 그것보다 대략 1.4배 정도 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 최대 응답 가속도에 상응하는 주기가 각각 0.04~0.05초와 0.1~0.15초로 나타났다. 최대 응답 가속도에 상응하

는 주기는 각각 개량 지반의 고유진동수와 입력지진파의 탁월주기와 연관이 있는 것으로 판단된다.

4. 수치해석

스톤칼럼으로 개량된 지반의 지진응답특성 분석을 위해 수치해석을 수행하여 그 결과와 1g 진동대 실험결과를 비교하고 분석하였다. 수치해석은 1차원 지반응답 해석 프로그램인 SHAKE를 사용하였다. SHAKE를 이용하여 1차원 지반응답 해석을 수행하기 위해 Baez의 가정(Baez, 1995)을 적용하였다(표 4).

4.1 1차원 지반응답 해석

SHAKE를 사용하여 1차원 지반응답 해석을 수행하기 위해서는 지반의 초기 최대 전단탄성계수(또는 초기 전단파 속도)가 필요하다. Baez(1995)는 스톤칼럼과 원지반의 전단변형률은 서로 같다고 가정하여 스톤칼럼과 원지반의 전단응력 분포 계산을 위한 관계식을 제안했다. Baez의 가정 및 관계식을 통해 스톤칼럼으로 개량된 지반과 같은 복합지반의 초기 최대 전단탄성계수를 아래와 같이 구할 수 있다(Timothy et al., 2002).

$$V_{imp} = V_{sc} + V_s \quad (1)$$

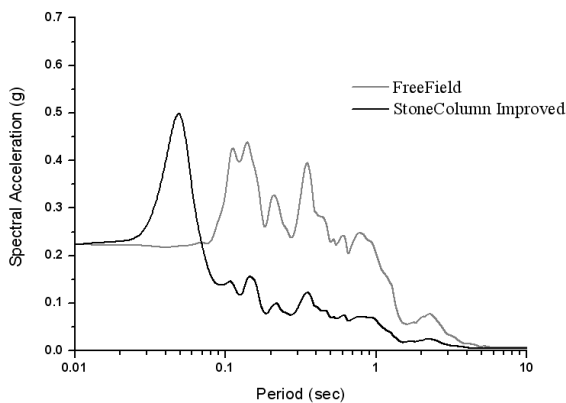


그림 8. Hachinohe 파에 대한 가속도 응답 스펙트럼

이때 V_{imp} , V_{sc} , V_s 는 각각 개량된 지반, 스톤칼럼, 그리고 원지반에 작용하는 전단력이다. 전단력을 전단응력과 응력이 가해지는 지반의 단면적으로 환산하면

$$\tau_{imp} \times A_t = \tau_{sc} \times A_{sc} + \tau_s \times A_s \quad (2)$$

여기서

$\tau_{imp}, \tau_{sc}, \tau_s$ 는 개량된 지반, 스톤칼럼, 그리고 원지반에 가해지는 전단응력이고,

A_t, A_{sc}, A_s 는 개량된 지반의 단위 단면적, 스톤칼럼, 그리고 원지반의 단면적이다.

식 (2)에서 전단응력 $\tau = G \cdot \gamma$ 를 대입하고(여기서 G는 지반의 최대 전단탄성계수, γ 는 전단변형률) 단면적을 단위셀(unit cell; Barksdale & Bachus, 1983)에 사용된 면적비(a_s)로 치환하면

$$G_{imp} = G_{sc} \times a_s + G_s \times (1 - a_s) \quad (3)$$

여기서

G_{imp}, G_{sc}, G_s 는 개량지반, 스톤칼럼, 그리고 원지반의 최대 전단탄성계수이다.

면적비(a_s)는 스톤칼럼 설치 형태에 따라 달라지는데

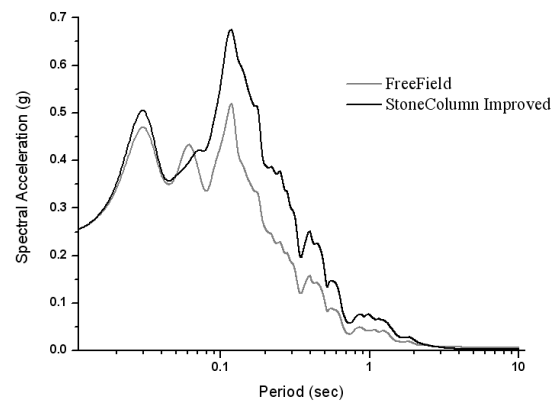


그림 9. Ofunato 파에 대한 가속도 응답 스펙트럼

표 4. 수치해석에 사용된 모형지반의 물성

지반 물성	stone column improved ground(복합지반)
전단파 속도	31.63m/sec
단위중량	17 kN/m ³
전단탄성계수 감소곡선	Vucetic and Dobry(1991) with PI=15
감쇠비 곡선	

본 연구에서는 삼각형 배치로 가정하고 스톤칼럼의 설치 간격을 가속도계 설치 위치로 환산해서 구하였다(식 4).

$$a_s = 0.907 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (4)$$

여기서

a_s 는 면적비, D 는 스톤칼럼의 직경, s 는 스톤칼럼의 설치간격이다.

한편, 스톤칼럼과 모형지반의 초기 최대 전단탄성계수 및 단위중량은 각각 실내시험과 1g 진동대 실험에서 구한 전단파 속도를 이용하였다(표 4). SHAKE 를 이용한 1차원 지반응답 해석을 보다 단순화 시키기 위해 스톤칼럼으로 개량된 지반의 변형 특성인 최대 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 하나로 통합해서 사용하였다. 스톤칼럼의 경우 미소변형 구간에서 비선형 거

동이 나타나는 것을 실내시험을 통해 확인하였기 때문에 Vucetic and Dobry(1991)의 점토 곡선중 소성지수가 15인 곡선을 사용하였다.

4.2 해석결과 분석

원지반에 대한 1g 진동대 실험결과와 SHAKE 해석결과를 그림 10과 11에 나타내었다.

1차원 등가 선형 해석 결과들을 1g 진동대 실험결과와 비교 분석하였다. 1차원 등가선형해석 결과는 실험결과에 비해 응답 스펙트럼 가속도가 다소 큰 경향을 보이고 있다.

그림 12와 13은 개량 지반에 대한 1g 진동대 실험과 1차원 등가 선형해석 결과들이다. 응답 스펙트럼 분석 결과, 0.03~0.04 초 부근에서 모든 응답 스펙트럼 가속도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이런 응답 스펙트럼 가속도 증가의 원인은 스톤칼럼 설치로 인해 지반

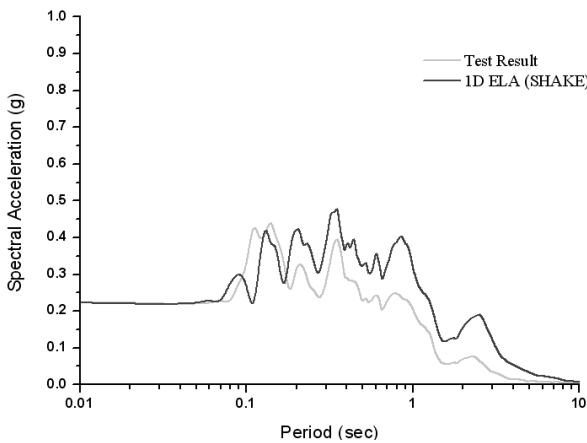


그림 10. 원지반의 Hachinohe 파에 대한 응답 스펙트럼

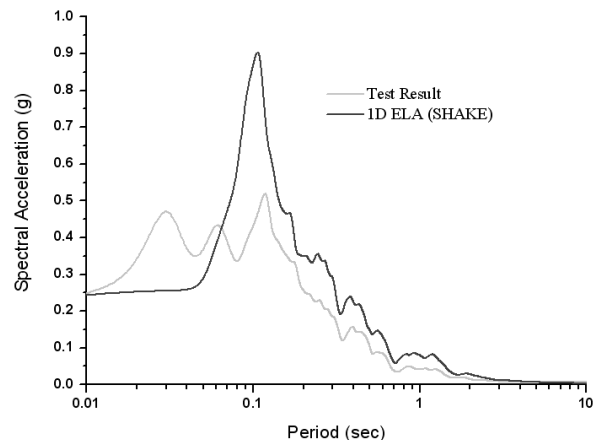


그림 11. 원지반의 Ofunato 파에 대한 응답 스펙트럼

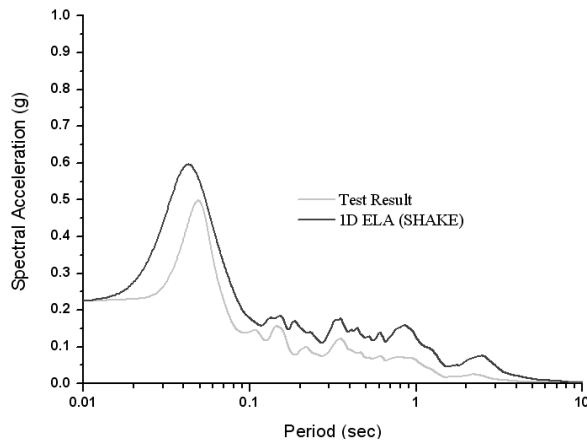


그림 12. 개량지반의 Hachinohe 파에 대한 응답 스펙트럼

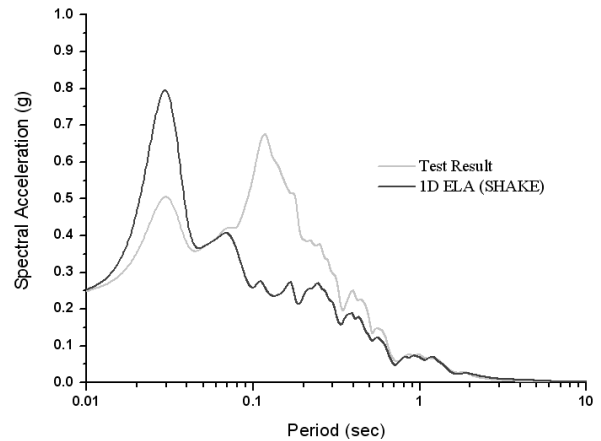


그림 13. 개량지반의 Ofunato 파에 대한 응답 스펙트럼

강성이 높아져 지반 전체의 고유진동수가 증가했기 때문이라 판단된다. Ofunato 지진파에 대한 응답스펙트럼의 경우, 1g 진동대 실험과 유한요소 해석 결과에서는 Ofunato 지진파의 탁월주기(4.8Hz)에 가까운 0.2초(5Hz) 부근에서도 가속도가 크게 증폭되었다. 이와 같은 결과를 살펴봤을 때, Baez의 가정을 이용한 1차원 등가선형 해석은 실험결과와 대체로 부합되는 경향을 보인다고 판단할 수 있다. 그러나 1차원 등가선형 해석은 지반의 변형특성인 최대 전단탄성계수 감소곡선이나 감쇠비 곡선 선택에 따라 결과가 달라진다는 것을 유의하여야 하며(한국지반공학회, 2010), 전술한 바와 같이 실험을 통해 얻은 동적특성을 적절히 보정하여 사용하는 것이 바람직하다.

5. 연구 요약 및 결론

스톤칼럼으로 개량된 지반의 지진응답특성을 1g 진동대 실험과 수치해석 방법을 이용해 분석하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

스톤칼럼으로 개량된 지반은 지진하중의 주기 특성에 따라 지반응답이 현저하게 달라진다. 스톤칼럼 설치로 인해 원지반의 강성이 커짐에 따라 지반의 고유진동수가 증가한다. 따라서 개량된 지반은 단주기 특성을 가진 지진하중을 받을 때 개량되지 않은 지반에 비해 지반가속도가 크게 증가할 수 있다.

스톤칼럼으로 개량된 지반에서 지진의 주기 특성에 따라 가속도 크기가 달라질 수 있으나 일반적으로는 전단변위나 변형률을 감소시키는 효과가 있음을 실험을 통해 확인하였다.

Baez의 가정을 기초로 한 1차원 등가선형 해석은 대체로 실험결과와 유사한 경향을 보였다. 하지만 1차원 등가선형 해석에서 최대 전단탄성계수 곡선과 감쇠비 곡선의 선택은 그 결과에 매우 큰 영향을 끼치기 때문에 곡선 선택에 신중을 기해야 한다고 판단된다.

Baez의 가정을 기초로 한 1차원 등가선형 해석은 스톤칼럼으로 개량된 복합지반의 지반응답 해석을 수행할 때 정밀한 수치해석이나 모형실험 전에 대략적인 지반응답 경향을 파악할 수 있는 대안으로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 모형 지반의 전단계수 감소곡선을 여러 가지 제약조건 때문에 실내 시험으로 구하지 못하고 기존문헌에서 제시하는 곡선을 사용하였다. 점토의 특성이 복합지반의 동적 비선형 특성을 대표한다고 가정

하였고, 실험에 사용한 점토의 소정지수가 21이므로 이와 가장 유사한 Vucetic & Dobry(1991)의 곡선중 소정지수가 15인 최대 전단탄성계수감소곡선과 감쇠비 곡선을 사용하였다. 그리고 그 결과는 모형실험 결과와 대체로 유사한 경향을 보였다. 향후에는 Baez의 가정을 기초로 한 1차원 지반응답 해석에서 실험을 통해 얻은 복합지반의 동적특성 곡선을 보정한 후 사용하는 것이 추천된다. 마지막으로, 본 시험에서는 시간상사비에 대한 고려가 충분히 이루어지지 않았다. 향후 시간상사비에 따른 모형실험의 거동차이에 대한 분석이 필요할 것으로 판단되며 현재 이에 대한 후속연구가 진행 중이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역혁신인력양성사업(No. 2011-07-대-04-034)에 의해 연구되었음. 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

참고 문헌

1. 김진만, 이현진, 류정호 (2010), "1g 진동대를 이용한 쇄석말뚝으로 개량된 연약점토 지반의 응답 특성", 한국지반공학회 논문집 제26권 제12호 pp.61-70.
2. 한국지반공학회 (2010), 상호검증시험(Round Robin Test)을 통한 지진 지반응답해석 이해, (사) 한국지반공학회
3. Balaam, N. P. & Booker J. R. (1981), "Analysis of rigid rafts supported by granular piles", Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics, Vol.5, pp.379-403
4. Barksdale, R. D. & Bachus, R.C. (1983), Design and construction with stone columns, Final Report to FHWA
5. Baez J. I. (1995), A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns. Ph.D. Dissertation, University of Southern California
6. Baez J. I. & Martin G. R. (1995), "Permeability and shear wave velocity of vibro-replacement stone columns", Soil Improvement for Earthquake Hazard Mitigation, ASCE Geotechnical Special Publication, New York, NY49, pp.66-81.
7. Boulanger R. Idriss I. Stewart D. Hasash Y. Schmidt B. (1998), "Drainage capacity of stone columns or gravel drains for mitigating liquefaction", Proceeding soft Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE Geotechnical Special Publ. No.75(1), pp.678-690.
8. Goughnour R. R. & Bayuk A.A (1979), "A field study of long-term settlement of loads supported by stone columns in soft ground", Proceedings, International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques, Vol.1 Paris: 279-286.

9. Goughnour R.R. & Pestana J.M, (1998), "Mechanical behaviour of stone columns under seismic loading" 2nd international conference on ground improvement techniques, 8~9 October 1998, Singapore: 157-162.
10. Greenwood D.A (1975), "Vibroflotation: Rationale for design and practice", methods of treatment of unstable ground, ED FG Bell, Newness-Butters worth, London pp.189-209.
11. Iai S. (1988), "Large scale model tests and analysis of gravel rains", Report of Portand Harbour research Institute English Edition 27(3).
12. Idriss I. (1990), "Response of soft soil sites during earthquakes", H. B. Seed Memorial Symposium, Vol.2, Bi Tech: 273-289.
13. Kramer S. L. (1996), Geotechnical earthquake engineering Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ: 653
14. Mitchell J. K. & Huber (1985), "Performance of a stone column foundation", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 111(2): 205-223.
15. Mitchell J. K. & Wentz F.J. (1991), Performance of improved ground during the Loma Prieta Earthquake, University of California, Berkeley UCB/EERC Report91/12.
16. Onoue A. (1988), "Diagrams considering well resistance for designing spacing ratio of gravel drains", Soil sand Foundations 28(3):160-168.
17. Priebe H. J. (1989), "The prevention of liquefaction by vibro-replacement", Proceedings of Earthquake Resistance Construction and Design, Berlin, Germany.
18. Priebe H. J. (1991), "Vibro-replacement design criteria and quality control", In: Esrig, Bachus(Eds.), Deep Foundation Improvements: Design, Construction, and Testing, ASTM STP1089, pp.62-72. Philadelphia.
19. Goughnour R.R. & Pestana J.M, (1998), "Mechanical behaviour of stone columns under seismic loading" 2nd international conference on ground improvement techniques, 8~9 October 1998, Singapore: 157-162.
20. Seed H.B. & Booker J.R (1977), "Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains", ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division103 (7):757-768.
21. Timothy C. siegel, William M. Camp, Chang C.C, Marcos Loizias (2002), "Site response of improved ground in the coastal eastern United States", 4th international conference on ground improvement techniques, 26~28 March 2002, Kuala Lumpur, Malaysia, Vol.2
22. Vucetic M. & Dobry R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 117(1): 89-107.

(접수일자 2012. 3. 18, 심사완료일 2012. 4. 18)