쇄석다짐말뚝의 액상화 저감효과에 관한 연구

Evaluation of Liquefaction Mitigation of RAP (Rammed Aggregate Piers)

조국환* · 김현정** · 박양후*** · 배경태****

Cho, Kook Hwan · Kim, Hyun Jung · Park, Yang Hoo · Bae, Kyung Tae

Abstract

The Rammed Aggregate Piers(RAP) is the method to reduce the possibility of liquefaction by accelerating drainage and increasing shear resistance, which promotes dissipation of pore pressure occurred by vibration. Thus, this study investigates the reduction effect of liquefaction performing Shaking Table Test on soft ground. The reduction effect of excess pore pressure and characteristics of settlement of untreated and reinforced ground conditions were studied by varying ground acceleration and area replacement ratio. In results, the reduction effect of liquefaction is increased 10, 2.5, and 1.5 times from ground acceleration 0.1, 0.2, and 0.4(g) respectively.

Key words : Soft ground, Liquefaction Mitigation, Rammed Aggregate Piers(RAP), Shaking Table Test

요 지

쇄석다짐말뚝(Rammed Aggregate Piers, RAP)은 시공 시 타격에 의한 반복다짐으로 횡방향 응력을 증가시켜 주변지반의 전단저항력을 증가시키고 배수를 용이하게 함으로써 지진발생시 발생하는 간극수압의 소산을 촉진시켜 액상화 가능성을 조기에 저감시킬 수 있는 공법이다. 따라서 본 연구에서는 느슨한 포화 사질토 지반에 쇄석다짐말뚝을 조성하여 진동대 시험(Shaking Table Test)을 통해 액상화 저감효과를 고찰하였다. 이 연구를 수행하기 위해서 지반가속도와 치환율 변화에 따른 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 미처리 지반과 쇄석다짐말뚝 보강지반의 침하특성 및 과잉간극수압의 저감효과를 분석하였다. 치환율 증가에 따른 지반의 침하는 크게 감소하는 것으로 나타나 지반가속도 0.1 g인 경우 10배, 0.2 g인 경우 2.5배, 0.4 g인 경우 1.5배 이상 액상화 저감효과가 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 연약지반, 액상화, 쇄석다짐말뚝, 진동대 시험

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

산업사회의 발전으로 인한 물류량의 증가, 도로의 정체, 공해문제 등으로 인하여 국내 수송체계는 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 정시적이고 안정적인 수송체계로서 철도의 관심이 고조되고 있으며, 고속철도 및 신선철도 등 철도 노반공사 증가하고 있어, 연약지반 통과구간의 노반지지력 강화공법의 요구가 증대되고 있다. 또한 국토의 효율적인 이용 계획에 따라 그 동안 개발이 제한되어 왔던 해안 및 내륙의 연약지반 활용이 점차 증대되고 있다.

이러한 연약지반은 작은 규모의 지진에도 매우 취약하므로 현재 건축 구조물의 직접기초에 많이 활용되는 쇄석다짐말뚝기술을 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 유발되는 간극수압의 소산을 촉진시켜 액상화 가능성을 조기에 저감시킬 수 있고 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 침하

*정회원 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 부교수, 토질 및 기초기술사(E-mail : khcho@snut.ac.kr, 교신저자)

**삼보기술단 지반사업부 대리

***서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

****(주)대우건설 기술연구원 선임연구원

특성 및 과잉간극수압의 저감효과를 고찰하였다.

1.2 연구동향

모래다짐말뚝은 1980년대 중반 일본에서 도입된 이후 현재까지 국내 대부분의 연약지반 처리공법으로 사용되고 있으며 최근 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인하여 적용이 제한되고 있어 대체공법으로 쇄석기둥(Stone Column), 쇄석말뚝(Gravel Pile) 또는 조립토다짐말뚝(Granular Compaction Pile) 등으로 불리는 쇄석골재를 이용한 말뚝에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 한편, 시공방법 등에 따라서는 조립토다짐말뚝(Granular Compaction Pile), 쇄석다짐말뚝(Rammed Aggregate Piers, Geopier, Gravel Compaction Pile, Crushed-stone Compaction Pile) 및 진동다짐쇄석말뚝(Vibro-Compacted Gravel Pile, Vibrated Crushed-stone Compaction Pile) 등으로 부르는 경우도 있다.

쇄석다짐말뚝의 지지력 및 거동에 관한 연구 등은 다음과 같다.

김원철 등 (2003)은 말뚝재하시험 결과를 이용하여 지지력과 파괴거동을 고찰하였으며, 홍의준 등 (2003)은 모형토시험과 유한요소해석으로 자유변형을 조건화 거동을 검토하였다.

해외에서 쇄석다짐말뚝에 관한 기본 연구들은 1950년대 쇄석기둥(Stone Column)이 사용되기 시작하면서 연약지반의 개량과 구조물 기초 등으로 연구가 활발히 진행되었으며, 1980년대 중반 RAP(Rammed Aggregate Piers)의 도입으로 경제적이고 높은 활용성으로 전 세계적으로 널리 활용되고 있다. 이에 관한 기존의 연구들은 다음과 같다.

Barksdale과 Bachus(1983)는 1950년대부터 활용빈도가 점차로 증가한 쇄석기둥과 그 말뚝이 영향을 미치는 영향원을 하나의 단위로 묶는 단위셀 개념을 도입하고 말뚝과 보강지반의 강성차이에 의한 응력집중비를 제안하였다. Lawton 등 (1994a, b, 1999)은 현장재하시험과 수치해석을 통하여 단말뚝과 군말뚝의 거동, 말뚝의 응력분포와 하중전이 특성 및 횡방향 응력 등을 분석하여, 설계 사용하중 내에서는 군말뚝의 무리효과가 거의 없다고 하였다. 또한, 실제 지진하중을 모사한 실험을 통하여 쇄석다짐말뚝이 횡하중, 인발력 및 모멘트가 동시에 작용하는 지진하중 등에 적용 가능함을 입증하였으며, 인발력을 감소하기 위한 설계방법을 제안하였다. White 등(2004)은 현장 침하량을 모니터링하여 쇄석기둥의 직경과 길이가 쇄석다짐말뚝의 것보다 큼에도 불구하고 침하량이 3배정도 크게 측정되었음을 보고하였으며, 삼축압축시험을 수행하여 구성모델의 모델정수를 산정하고 이를 수치해석 모델링에 적용하여 실험치와 비교하였다. 또한, 쇄석다짐말뚝-지반-토목섬유의 상호관계를 분석하고 복합지반의 침하량, 응력집중비, 응력감소비 및 토목섬유의 인장력 등을 도출하였으며, 쇄석다짐말뚝에 지진하중 등의 동하중 작용 시 쇄석다짐말뚝의 전단변형계수를 산정하기 위하여 Seismic Telltale 시험을 수행하여 쇄석다짐말뚝의 전단변형계수의 범위가 263-372 MPa이라고 제안하였고, 최대 수평응력은 평균 120 kPa이라고 입증하였다.

액상화 현상에 대한 연구는 1960년대부터 Seed에 의해 시

그림 1. 쇄석다짐말뚝의 개요

작되었다. Seed와 Idriss(1971)는 액상화 대책공법으로 복합지반의 면적치환비는 전체면적에 대한 쇄석기둥(Stone Column)의 평면적의 비이고 응력비는 쇄석기둥(Stone Column)의 전단탄성계수에 대한 주변지반의 전단탄성계수의 비라 정의하였고, 말뚝에 의해 치환된 복합지반의 전단저항비 산정을 위한 식을 제안하였다.

1.3. 연구의 기본이론

1.3.1 쇄석다짐말뚝

본 연구에서 제시한 쇄석다짐말뚝(Rammed Aggregate Piers, RAP) 공법은 조립토다짐말뚝(Granular Compaction Pile)의 한 종류로 깊은기초와 얕은기초의 중간개념인 Intermediate Foundation이며 1980년대 중반 미국에서 시작하여 전 세계적으로 활용성을 넓혀가고 있다. 연약한 지반에 천공을 시행한 후 0.8 MPa의 높은 다짐에너지를 이용하여 쇄석을 반복적으로 다짐으로써 원지반의 전단강도 및 지지력을 높이는 공법으로 지반보강 및 기초공법 용도로 사용되며 침하량을 기준치 내로 제어함으로써 상부구조물을 지지한다. 원지반 및 높은 다짐에너지에 의해 구축된 쇄석다짐말뚝이 상부하중에 동시 저항하고 말뚝 설치 시 타격에너지를 쇄석에 직접 가하므로 쇄석기둥(Stone Column)공법에 비해 월등히 고강성이며, 본당 지지력은 지반별 30-50 ton 정도 적용 가능하다(그림 1).

2. 진동대 시험

본 연구에서는 쇄석다짐말뚝의 액상화 저감효과를 고찰하기 위하여, 실험크기의 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, 0.4 g의 입력가속도를 구현하여 3 Hz의 정현파로 15초 동안 진동을 재하 하였다. 시험에 사용된 토조는 52 cm(가로) × 50 cm(세로) × 70 cm(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 지반

의 상부 10 cm 지점과 하부 10 cm 지점에 각각 2개의 LVDT를 설치하였다.

2.1 지반 조건

진동대 시험에 사용된 원지반 조성용 모래는 표 1과 같이 유효입경(D_{10}) 0.17 mm, 평균입경(D_{50}) 0.48 mm, 균등계수(C_u) 3.18 그리고 비중 2.56의 사질토이다. 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 1.70 t/m^3 , 1.44 t/m^3 이며, 상대밀도 32%의 느슨한 지반을 수중침강법으로 조성하였다. 쇄석다짐말뚝 조성용 골재는 최대입경 25 mm 이하의 혼합골재를 사용하였으며, PVC관내에 래머로 층 다짐하여 설치하였다. 시험에 사용된 모래와 쇄석골재의 사진과 입도분포곡선은 그림 2와 같다.

2.2 복합지반 조성과정

현장에서 준설된 모래로 매립하여 지반을 조성하는 경우에는 젖은 모래를 살포하드로 본 시험에서는 일반적으로 사용하는 수중포설 방법의 원리를 이용하여 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 원지반을 조성하였다. 먼저 토조에 물을 약 50 cm 높이로 채운 후 #4번체를 수위에 맞추어 토조 내에 설치하였다. 이 후 젖은 모래를 물속에서 가볍게 분산시켜

(a) 원지반 조성용 모래 (b) 말뚝 조성용 쇄석

(c) 입도분포곡선

그림 2. 진동대 시험에 사용된 모래와 쇄석골재

표 1 사질토 물성시험 결과

G_s	γ_{dmax}	γ_{dmin}	D_{10}	D_{50}	c_u
2.56	1.70 t/m^3	1.44 t/m^3	0.17 mm	0.48 mm	3.18

체 밑으로 낙하하여 원지반을 조성하였다. 이와 같이 형성된 모래의 상대밀도는 약 32%로 상당히 느슨하게 지반이 조성되었다.

한편, 쇄석다짐말뚝 복합지반의 조성과정은 그림 3과 같다. 먼저 모형 쇄석다짐말뚝 케이싱(PVC관)을 각각 치환율 7, 14, 28%에 따라 말뚝 개수와 간격을 조절하여 설치하였다. PVC관의 자립을 위하여 관속에 쇄석을 5 cm 가량 채워 넣고, PVC관내로 모래가 들어가는 것을 막기 위하여 비닐 캡으로 PVC관 상부를 막아놓았다. 그 후 원지반 조성방법과 같이 토조에 물을 약 50 cm 높이로 채운 후 #4번체를 이용

그림 3. 복합지반 조성과정

그림 4. 복합지반 단면도(치환율 7%)

표 2. 진동대 시험조건

입력 가속도(g)	치환율	형상비	진동파형	주기
0.1	원지반	(5.26)	정현파	3 Hz
0.2	7%			
0.4	14% 28%			

하여 수중침강법으로 주변지반을 형성하였다. 쇄석다짐말뚝은 조성은 PVC관을 10 cm 가량 인발한 후 쇄석을 투입하고 래머를 이용하여 다지는 방법으로 각각 25회씩 3층으로 반복 다짐을 실시하여 다짐에너지를 현장 시공 시와 같이 0.8 MPa로 조절하였다. 치환율 7%인 경우의 복합지반 단면도는 그림 4와 같다.

2.3 시험조건

본 연구에서는 표 1과 같이 액상화가 일어나기 쉬운 비배수 포화 사질토 모형지반과 각각 치환율 7, 14, 28%의 쇄석다짐말뚝으로 보강한 복합지반을 성형하고, 일반적으로 우리나라의 내진설계기준에 적합하게 지진가속도는 정현파로 지반가속도를 각각 0.1, 0.2, 0.4 g로 설정하였다. 그리고 진동에 대한 주기는 각각 3 Hz에 대하여 15초간 지진하중을 재하 하여 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 쇄석다짐말뚝은 직경 7.6 cm, 길이 40 cm로 실물크기의 1/10 축소 모형을 사용하였다. 표 2는 시험조건을 정리하여 나타냈다.

3. 시험결과 및 분석

진동대시험 중 입력가속도와 실제 복합지반이 받는 지반가속도와의 차이를 고찰한 후, 지진하중 작용 시 지반가속도와 치환율 변화에 따른 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 원지반과 쇄석다짐말뚝 보강지반의 침하특성과 간극수압의 변화를 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, 0.4 g의 입력가속도를 재하하여 복합지반에 설치한 가속도계의 측정값과 비교하였다. 그림 5와 같이 입력가속도 0.1, 0.2 g인 경우에는 입력가속도와 지반가속도의 차이가 별로 없었으나 입력가속도 0.4 g인 경우 토조 측면에서 측정된 가속도는 진동 가압장치와 토조의 유격에 의해 지반가속도가 입력가속도보다 다소 크게 측정되었다.

3.2 쇄석다짐말뚝의 액상화 저감효과

원지반의 침하특성으로 그림 6에서와 같이 가속도가 0.1, 0.2, 0.4 g로 증가함에 따라 각각 최대 21, 35, 36 mm로 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 침하에 도달하는 시간은 각각 15, 10, 2초로 지반가속도 증가에 따라 침하가 대부분 초기에 발생하는 것으로 나타났다. 한편 지진하중 작용 시 지반가속도 증가와 지반의 치환율 증가에 따른 지반의 침

(a) 0.1g

(b) 0.2g

(c) 0.4g

그림 5. 지진 지속시간에 따른 지반가속도

하는 그림 6(a)와 같이 지반가속도 0.1g인 경우 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 각각 최대 2.0, 0.2, 0.1 mm로 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 쇄석다짐말뚝으로 보강하지 않은 원지반에 비해 10배 이상 액상화 저감효과가 있는 것으로 판단된다. 그림 6(b)와 같이 지반가속도 0.2 g인 경우에는 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 각각 최대 14, 13, 10 mm로 원지반에 비해 각각 약 2.5, 2.7, 3.5배의 액상화 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 그림 6(c)와 같이 지반가속도 0.4 g인 경우에는 치환율이 증가함에 따라 각각 최대 24, 17, 12 mm로 가속도 0.1 g와 0.2 g에 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.

(a) 가속도 0.1g

(b) 가속도 0.2g

(c) 가속도 0.4g

그림 6. 지반가속도와 치환율에 따른 지반의 침하특성

3.3. 말뚝과 주변지반의 침하특성

지진하중 작용 시 치환율 증가에 따른 쇄석다짐말뚝과 주변지반의 침하는 그림 7과 같이 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 말뚝의 경우 각각 최대 16, 14, 11 mm로 지반의 경우 각각 최대 24, 17, 12 mm로 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 7(a)와 같이 치환율 7%인 경우 말뚝은 각각 최대 1, 8, 16 mm, 지반은 각각 최대 2, 14, 24 mm로 나타났으며, 그림 7(b)와 같이 치환율 14%인 경우에는 각각 최대 0.1, 7, 14 mm, 지반은 각각 최대 0.2, 13, 17 mm로 나타났고, 그림 7(c)와 같이 치환율 28%인 경우에는 각각 최대 0.1, 6, 11 mm, 지반은 각각 최대 0.2, 9, 12 mm로 나타나 가속도 증가와 침하의 상관성이 매우 큰 것으로 판단된다.

쇄석다짐말뚝의 액상화 저감효과에 관한 연구

(a) 치환율 7%

(b) 치환율 14%

(c) 치환율 28%

그림 7. 지반가속도와 치환율에 따른 말뚝과 주변지반의 침하특성

3.4. 간극수압 변화

본 실험결과 지진하중이 발생하면 토체내에 과잉간극수압이 발생하게 된다. 일반적으로 지진하중이 발생함에 따라 점차적으로 간극수압이 증가하다가 일정한 값에 수렴하는 형태를 보이게 된다. 실험결과 쇄석다짐말뚝 지반의 치환율 증가에 따라서 배수를 용이하게 함으로써 간극수압의 소산을 촉진시켜 액상화 가능성을 조기에 저감시키는 것을 알 수 있었다. 그림 8은 미처리 지반과 치환율 7, 14, 28%의 쇄석다짐말뚝 지반에 0.1, 0.2, 0.4 g의 가속도를 주어서 그림 4에 나타난 바와 같이 깊이 30 cm에 위치하는 과잉간극수압계 1번의 수압을 측정된 것이다. 과잉간극수압비(γ_u)는 식 1에 나타난 바와 같이 정의한다. 측정 결과 미처리지반의 과잉간극수압비는 가속도가 0.1, 0.2, 0.4g로 증가함에 따라서 1.04,

(a) 0.1g 간극수압 변화

(b) 0.2g 간극수압 변화

(c) 0.4g 간극수압 변화

그림 8. 간극수압 변화

표 3. 가속도에 따른 최대 과잉간극수압

가속도 \ 치환율	미처리	7%	14%	28%
0.1g	5kPa	0.5kPa	0.05kPa	0.025kPa
0.2g	7kPa	3kPa	2.5kPa	2kPa
0.4g	9kPa	6kPa	4kPa	3kPa

1.45, 1.87로 액상화 판단기준인 1보다 크게 되므로 액상화 현상이 발생됨을 알 수 있었다.

$$\gamma_u = \frac{\text{과잉간극수압}}{\text{유효응력}} \quad (1)$$

또한 표 3은 가속도가 0.1, 0.2, 0.4 g로 증가함에 따라서 치환율을 7, 14, 28%로 증가시켜 간극수압을 측정된 것을 정리하였다. 가속도 0.1g인 경우 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 수압의 변화량은 각각 최대 0.5, 0.05, 0.025 kPa로 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 쇄석다짐말뚝으로 보

강하지 않은 원지반에 비해 10, 100, 200배 이상 액상화 저감효과가 있는 것으로 판단된다. 지반가속도 0.2g인 경우에는 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 수압의 변화량은 각각 최대 3, 2.5, 2 kPa로 원지반에 비해 각각 약 2.3, 2.8, 3.5배의 액상화 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 지반가속도 0.4 g인 경우에는 토조의 유격에 의해 지반가속도가 입력 가속도 보다 다소 크게 측정되었는데 이에따라서 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 각각 최대 6, 4, 3 kPa로 가속도 0.1 g와 0.2 g에 비해서는 액상화 저감효과가 적었으나 원지반에 비해 각각 약 1.5, 2.5, 3.0배 침하가 감소함을 알 수 있었다.

4. 결 론

진동대 시험을 통해 지진하중 작용 시 지반가속도와 치환율 변화에 따른 쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 원지반과 쇄석다짐말뚝 보강지반의 침하특성과 간극수압의 변화를 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 쇄석다짐말뚝과 주변지반의 침하특성은 치환율 증가가 침하량의 감소 및 침하시간을 지연시키는 것을 알 수 있었다.
- 3) 치환율 증가에 따른 지반의 침하는 크게 감소하는 것으로 나타나 지반가속도 0.1 g인 경우 쇄석다짐말뚝으로 보강하지 않은 원지반에 비해 10배 이상 액상화 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 0.2 g인 경우 2.5배 이상 0.4 g인 경우 1.5배 이상 액상화 저감효과가 있는 것으로 판단된다.
- 4) 치환율 증가에 따른 과잉간극수압 변화 특성은 가속도 증가에 따라 과잉간극수압의 발생이 증가하나 액상화를 발생시킬 정도로 증가하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 쇄석다짐말뚝을 사용할 경우 액상화 저감효과가 상당히 증가함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 김원철, 조양운, 서덕동 (2003) 단일 쇄석다짐말뚝의 Bulging 및 General Shear Failure시의 극한지지력 비교 연구, 2003년 한국지반공학학회 기초기술학술발표회논문집, pp. 141-152.
- 홍의준, 김재권, 정상섭, 김수일 (2003) 연성하중을 받는 모래다짐말뚝(SCP)의 거동분석, 한국지반공학학회논문집, 제19권, 제4호, pp. 223-233.
- Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. (1983), Design and Construction of Stone Column, FHWA, Report, No.RD-83/026.
- Lawton, E.C. and N.S. Fox, R.L. Handy (1994) "Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers", In-Situ Deep Improvement, Proceedings, ASCE National Convention, Atlanta, Georgia, pp. 121-132.
- Lawton, E.C. and Fox, N.S. (1994) "Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soils Stiffened with Short Aggregate Piers", Vertical and Horizontal Deformations of

- Foundations and Embankments Vol. 2, Proceedings of Settlement'94, Geotechnical Special Publication No. 40, ASCE, pp. 962-974.
- Lawton, E.C. (1999) "Performance of Geopier Foundations during Simulated Seismic Tests at South Temple Bridge on Interstate 15", Salt Lake City Utah, Interim Report, No. UUCVEEN 99-06, University of Utah, Salt Lake City.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971) "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM9, p. 1249.
- White, D. and Suleiman, M. (2004) "Design of Short Aggregate Piers to Support Highway Embankments", Transportation Research Board 83rd Annual Meeting, January, 2004. pp. 103-112.

◎ 논문접수일 : 11년 06월 28일
◎ 심사의뢰일 : 11년 07월 06일
◎ 심사완료일 : 11년 11월 29일