

## 쇄석다짐말뚝에 의한 연약지반의 액상화 저감효과에 관한 연구 Liquefaction Remediation by Rammed Aggregate Piers(RAP) on Soft Ground

안동석<sup>1)</sup>, Dong-Seok An, 배경태<sup>2)</sup>, Kyung-Tae Bae, 박성완<sup>3)</sup>, Seong-Wan Park

<sup>1)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Dankook Univ.

<sup>2)</sup> 서울산업대학교 건설기술연구소 박사후연구원, Post-Doc., Inst. of Const. and Tech., Seoul National Univ. of Technology

<sup>3)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Dankook Univ.

**SYNOPSIS** : Dynamic numerical analyses were performed to investigate the response of liquefaction remediation of rammed aggregate piers(RAP) on soft ground under free strain conditions. The safe factors of the soft ground reinforced by RAP during seismic loading of magnitude 6.5 were calculated. The results of simulation showed that factors of safety were affected various area replacement ratios, surcharge loads and depth of RAP systems.

**Key words** : Liquefaction Remediation, Rammed Aggregate Piers, Numerical Analysis

### 1. 서 론

조립토 다짐말뚝공법은 다양한 연약지반 처리방법 중 지진 시 발생하는 액상화 현상을 저감시키기 위한 연약지반 보강에 효율적이고 경제적인 공법으로 알려져 있다. 쇄석다짐말뚝(Rammed Aggregate Piers, RAP)은 시공 시 타격에 의한 반복다짐으로 쇄석의 횡방향 응력을 증가시켜 주변지반의 전단저항력을 증가시키고 배수를 용이하게 함으로서 지진발생 시 액상화 및 지진하중에 대한 저항력이 큰 공법이다(Fox and Cowell, 1988). 또한, 모래다짐말뚝에 비해 강성이 크고 쇄석재료의 확보 등이 용이하여 향후 연약지반 액상화 저감공법으로의 활용이 더욱 증대될 전망이다. 그러나 일반적으로 쇄석다짐말뚝으로 보강된 연약지반의 액상화 평가 시 쇄석다짐말뚝과 지반을 하나의 단일 물성으로 환산하여 해석을 하고 있어, 실제 자유변형률(free strain)이 작용하는 성토체 등의 연성기초 하부에 설치되는 쇄석다짐말뚝의 경우 치환율, 상재하중에 따른 말뚝과 주변지반의 위치와 깊이별 액상화 안전율이 상이하므로 이에 따른 액상화 안전율의 구명이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 연약지반의 액상화 저감을 위하여 사용되는 쇄석다짐말뚝의 적용을 위하여 동적 수치해석을 수행하여 쇄석다짐말뚝과 지반의 치환율, 상재하중에 따른 기초지반의 액상화 저감효과를 고찰하였다. 이를 위하여 김해시 ○○지역 연약지반 노반공사 부지의 포화사질토에 대하여 규모 6.5의 지진하중 발생 시 각각 원지반과 쇄석다짐말뚝의 치환율 7%, 14%, 28%로 보강한 경우의 액상화 안전율을 상재하중과 복합지반의 위치와 깊이별로 산정하였다.

### 2. 쇄석다짐말뚝 설치에 따른 액상화 저감

#### 2.1. 액상화 저감 메커니즘

쇄석다짐말뚝 공법으로 보강된 지반은 다음과 같은 방법에 의해 액상화 발생 위험성을 감소시킨다. 쇄석다짐말뚝 시공 시 쇄석 다짐에 의해 발생하는 횡방향응력은 주변의 원지반을 다짐시키는 효과가 있으며 이에 의해 원지반의 전단강도 증가를 유발하여 액상화에 대한 저항력을 증가시킨다. 쇄석다짐말

뚝 시공에 의해 형성된 말뚝체는 gravel drain으로서 작용하여 간극수압 소산을 위한 효과적인 배수 통로로서 역할을 한다. 쇄석다짐말뚝체는 주변지반보다 강성이 더 크기 때문에 보강지반에 작용하는 지진하중은 강성이 큰 말뚝체에는 큰 하중이, 강성이 작은 원지반에는 보다 작은 하중이 전달되는 하중분담효과를 유발한다. 따라서 쇄석말뚝에 의해 치환된 부분은 지진하중 작용 시 지반내부에 발생하는 큰 전단응력을 소산시키는 역할을 함으로써 보강지반은 동일한 진동하중에 대해 결과적으로 더 큰 저항력을 발휘한다. 그림 2.1은 지진하중 작용 시 쇄석다짐말뚝에 의해 보강이 이루어진 복합지반의 하중분담 효과에 대한 개념도이다.

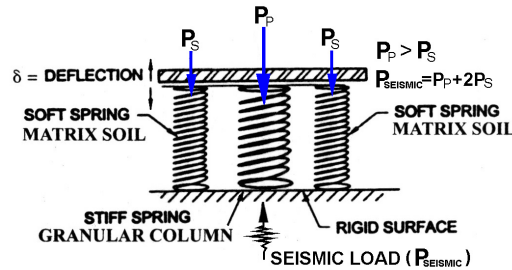


그림 2.1. 지진하중 작용 시 쇄석다짐말뚝 복합지반의 하중분담효과(Fox and Cowell, 1988)

## 2.2. 쇄석다짐말뚝 보강에 의한 액상화 평가

수정 Seed와 Idriss 방법을 사용한 쇄석다짐말뚝 보강에 의한 액상화 평가는 지진에 의한 전단응력비(Cyclic Stress Ratio,  $CSR = \tau / \sigma'$ )와 지반의 액상화 저항응력비(Cyclic Resistance Ratio,  $CRR = \tau_s / \sigma'$ )와의 비교를 통해 안전율 1.5를 기준으로 액상화 안정을 판단한다(해양수산부, 1999).

$$F.S = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

### 2.2.1. 지진하중에 의한 전단응력비

지진시 발생하는 전단응력비(Cyclic Shearing stress Ratio, CSR)는 대상 지반의 지진응답해석으로 산정한 최대 지반가속도를 사용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$CSR = \frac{\tau}{\sigma'} = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma}{\sigma'} \right) \quad (2)$$

여기서,  $\frac{\tau}{\sigma'}$  : 지진하중에 의한 전단응력비,  $\sigma$  : 대상층의 총 상재압(  $tf/m^2$  )  
 $a_{max}$  : 최대 지반가속도(  $m/sec^2$  ),  $\sigma'$  : 대상층의 유효상재압(  $tf/m^2$  )  
 $g$  : 중력 가속도(  $m/sec^2$  )

본 연구에서는 큰 지진이 발생하지 않은 국내의 여건을 고려하여 우리나라에 적합한 지진규모인 6.5 부근에서 발생한 역사지진기록을 선택하여 지진응답해석을 수행한 김수일 등(2006)의 연구 결과를 토대로 해석을 수행하였다. 지진응답해석의 조건과 입력 지진기록의 제원은 다음의 표 2.1 및 표 2.2에 나타난 바와 같다. 한편, 그림 2.2는 위에서 수행한 지진응답해석으로 도출한 최대지반가속도를 이용하여 국내 해안 매립지에 대해 산정한 전단응력비이다. 심도에 따른 전단응력비는 최대 0.5 이하를 나타내고 있으므로 본 연구에서는 전단응력비를 가장 위험치인 0.5로 가정하고 액상화 저감효과를 평가하였다.

표 2.1. 지진응답해석 조건

설계지진 가속도	0.11g
설계지진 규모	6.5
입력지진 기록	Big Bear, Imperial Valley, San Fernando
지하수위 위치	심도 0m

표 2.2. 지진응답해석에 사용된 입력지진

지진명	제 원	지진규모	최대가속도
Imperial Valley	1979년 Southern California	6.4	0.165g
Big Bear	1992년 Southern California	6.5	0.481g
San Fernando	1971년 Southern California	6.6	0.270g

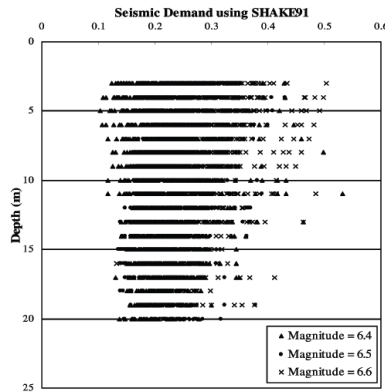


그림 2.2. 지진응답해석에 의한 전단응력비(김수일 등, 2006)

### 2.2.2. 지반의 액상화 저항능력비

지진 시 지반의 액상화 저항능력비(Cyclic Resistance Ratio,  $CRR = \tau_s / \sigma'$ )는 현장시험을 통해 산정한 SPT의  $N$ 값, CPT의  $q_c$  또는 탄성파시험의 전단파속도  $v_s$  등을 이용하여 저항능력비를 산정한다. 본 연구에서는 쇄석다짐말뚝 보강에 의한 복합지반의 치환율, 상재하중에 따른 말뚝과 주변지반의 위치와 깊이별 액상화 저감효과를 평가하기 위하여 위의 조건들을 용이하게 적용할 수 있는 유한차분해석을 수행하여 지반의 액상화 저항능력비를 산정하였다.

## 3. 수치해석 조건

원기둥 형태의 쇄석다짐말뚝을 모사하기 위하여 축대칭(axisymmetric) 평면변형(plane strain) 해석으로 지진하중에 의한 지반의 응력-변형률을 알아내기 위하여 동적해석을 실시하였다(FLAC 5.0). 해석 지반은 액상화 가능성이 높은 N치 5이하의 모래층으로 이루어진 상대밀도 중간 정도의 포화사질토라고 가정하고, 쇄석다짐말뚝 보강에 의한 복합지반의 액상화 저감효과를 살펴보기 위하여 포화모래층과 쇄석다짐말뚝 두 영역으로 모델링하였다. 입력물성치는 표 3.1과 같이 현장 쇄석다짐말뚝 재하시험을 수행하여 얻은 결과를 참고하였다(배경태, 2007).

표 3.1. 수치해석 입력물성치

재 료	모 델	N치	단위중량	변형계수	포아송비	내부마찰각
		(blow)	( $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup> )	(E, kPa)	$\nu$	( $\phi$ , °)
모래지반	Mohr-Coulomb	5	18	1.0e4	0.35	28
RAP	Elastic	-	20	5.4e5	0.40	-

해석영역은 각각의 치환율에 따른 단위셀 이론(Barksdale and Bachus, 1983)의 유효직경으로 산정하고, 치환율은 국내 연약지반 처리에 일반적으로 사용되는 저치환율인 7%, 14%, 28%로 가정하였다. 치환율에 따른 모래지반의 등가반경은 원지반을 2.0m로 가정함에 따라 치환율이 각각 7, 14, 28%에 대하여 1.5m, 1.1m, 0.8m로 계산되었으며, 쇄석다짐말뚝은 현장에서 주로 적용되는 직경 0.8m, 길이 8.0m로 모델링 하였다. 해석에 사용된 지진파는 단주기 성분이 우세한 ofunato항의 지진기록과 장주기 성분이 우세한 hachinohe항의 실지진기록 2개와 표준설계 응답스펙트럼 기준을 만족하는 인공지진 기록 1개를 이용하였다. 실제 성토체 하부에 설치되는 쇄석다짐말뚝을 모사하기 위하여 자유변형률 조건(배경태 등, 2007)으로 상재하중을 재하하였으며, 각각 40, 80, 120 및 160kPa의 등분포하중을 재하하여 액상화 저감효과를 고찰하였다. 수치해석 조건은 다음 표 3.2와 같다.

표 3.2. 수치해석 조건

지진파	치환율(%)	등분포 상재하중(kPa)
ofunato	7	40
hachinohe	14	80
artificial	28	120
		160

## 4. 해석 결과 및 분석

### 4.1. 복합지반 위치에 따른 액상화 저감효과

그림 4.1은 쇄석다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 심도 중심인 G.L. -4m에서의 말뚝 중심거리에 따른 치환율별 안전율을 나타낸 그림이다. 각각 단주기, 장주기 지진파인 ofunato, hachinohe 지진 및 가상 인공지진이 발생한 경우에 대하여 상재하중이 40, 80, 120 및 160kPa 작용한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 그림에서와 같이 대부분 말뚝중심부가 주변지반 보다 안전율이 크게 산정되었으며, 말뚝 중심에서 가장 먼 곳 보다는 말뚝과 지반의 경계부인 0.5m 근처에서 안전율이 가장 작게 나타났다. 한편, 치환율 7%인 경우의 안전율은 말뚝부에서는 2.3~3.1, 주변지반에서는 1.8~2.3, 치환율 14%인 경우에는 말뚝부 2.9~3.5, 주변지반 2.4~3.4, 또한 치환율 28인 경우에는 말뚝부 4.3~5.1, 주변지반 2.7~4.0으로 나타나 치환율에 따라 안전율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

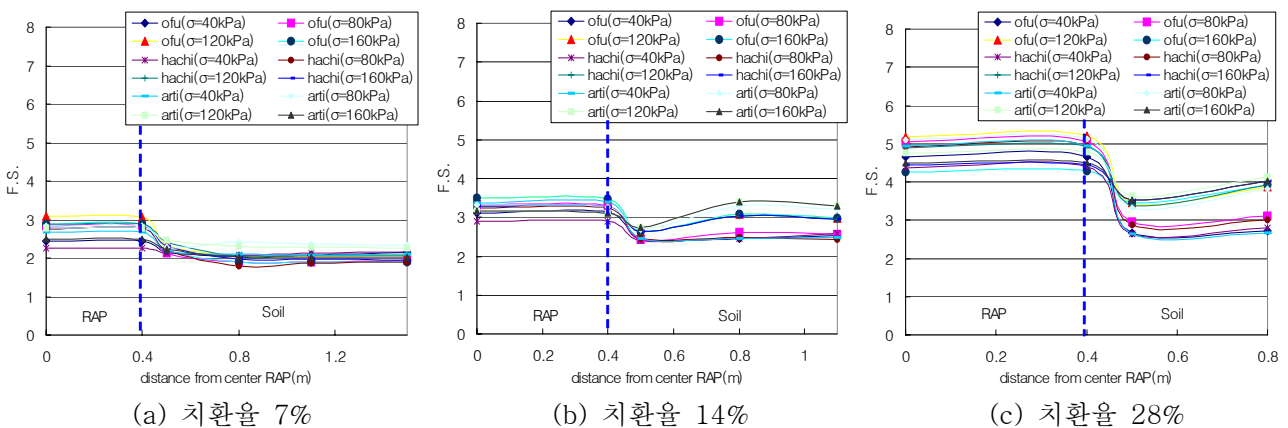


그림 4.1. 복합지반 위치에 따른 액상화 안전율

### 4.2. 복합지반 심도에 따른 액상화 저감효과

그림 4.2는 위의 4.1절에서 안전율이 가장 작게 나타난 말뚝과 지반의 경계부인 말뚝 중심거리 0.5m

지점에서의 복합지반 침도에 따른 치환율별 안전율을 나타낸 그림이다. 각각 단주기, 장주기 지진파인 ofunato, hachinohe 지진 및 가상 인공지진이 발생한 경우에 대하여 상재하중이 40, 80, 120 및 160kPa 작용한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 지표면 근처에서는 안전율이 0.9~1.6으로 1.5보다 작아 액상화에 다소 위험한 것으로 나타나 쇄석다짐말뚝으로 보강 시 지표면 액상화 안정처리에 신중해야 할 것으로 판단된다. 또한, 침도 2m 부근부터 안전율이 크게 증가하여 1.4~3.6으로 대부분 액상화에 안전한 것으로 나타났다.

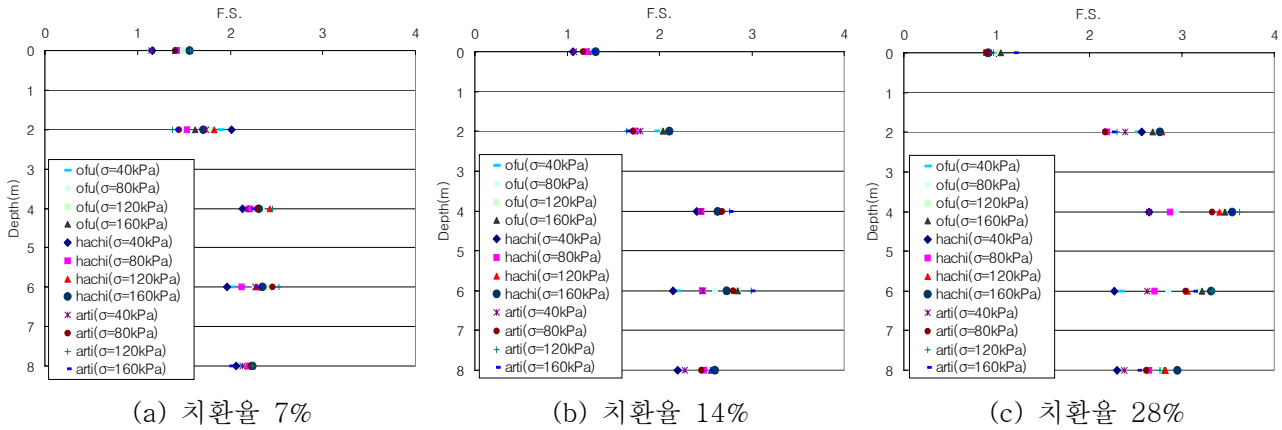


그림 4.2. 복합지반 침도에 따른 액상화 안전율

### 4.3. 치환율과 상재하중에 따른 액상화 저감효과

그림 4.3 및 4.4는 위의 4.1 및 4.2절의 복합지반의 침도 4m, 말뚝 중심거리 0.5m 지점에서의 치환율과 상재하중에 따른 안전율을 쇄석다짐말뚝으로 보강하지 않은 원지반과의 해석 결과와 비교한 그림이다. 각각 원지반과 치환율 7, 14, 28%의 쇄석다짐말뚝으로 보강된 복합지반에 대하여 단주기, 장주기 지진파인 ofunato, hachinohe 지진 및 가상 인공지진이 발생한 경우에 대하여 상재하중이 40, 80, 120 및 160kPa 작용한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 4.3에서와 같이 치환율에 따른 액상화 저감효과를 살펴보면 원지반의 안전율이 0.6~1.1로 액상화에 위험한 것으로 나타났으나, 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 안전율이 각각 2.1~2.5, 2.4~2.8, 2.6~3.6으로 증가하여 치환율 증가에 따른 액상화 저감효과가 큰 것으로 나타났다. 한편, 그림 4.4에서와 같이 상재하중에 따른 액상화 저감효과를 살펴보면 원지반의 안전율이 0.6~1.1로 액상화에 위험한 것으로 나타났으나, 상재하중이 40, 80, 120, 160kPa으로 증가함에 따라 안전율이 각각 2.1~2.7, 2.1~3.3, 2.3~3.6, 2.2~3.5로 쇄석다짐말뚝으로 인한 액상화 저감효과는 큰 것으로 나타났으나, 상재하중 증가에 따른 액상화 저감효과는 다소 미미한 것으로 나타났다.

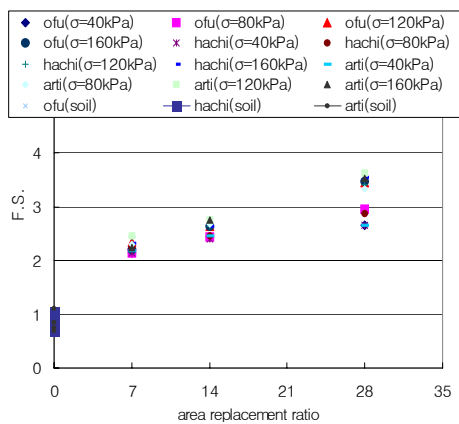


그림 4.3. 치환율에 따른 액상화 안전율

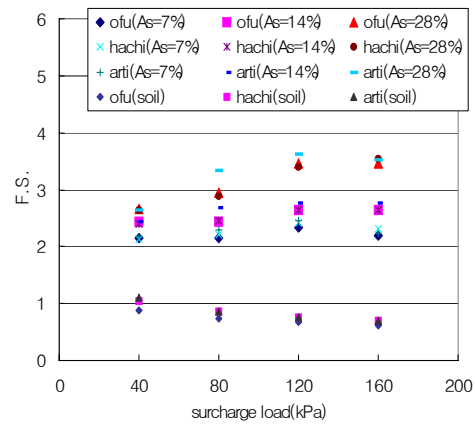


그림 4.4. 상재하중에 따른 액상화 안전율

## 5. 종합

동적 수치해석을 실시하여 쇄석다짐말뚝으로 보강된 복합지반의 치환율, 상재하중에 따른 말뚝과 주변지반의 위치와 깊이별 액상화 저감효과를 고찰하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 복합지반 위치에 따른 액상화 저감효과를 살펴보면, 대부분 말뚝중심부가 주변지반 보다 안전율이 크게 산정되었으며, 말뚝 중심에서 가장 먼 곳 보다는 말뚝과 지반의 경계부에서 안전율이 가장 작게 나타났다.
- (2) 복합지반 심도에 따른 액상화 저감효과를 살펴보면, 지표면 근처에서는 액상화에 다소 위험한 것으로 나타났으나, 심도 2m 부근부터 안전율이 크게 증가하여 대부분 액상화에 안전한 것으로 나타났다.
- (3) 치환율과 상재하중에 따른 액상화 저감효과를 살펴보면, 치환율이 7, 14, 28%로 증가함에 따라 액상화 저감효과가 큰 것으로 나타났으나, 상재하중 증가에 따른 액상화 저감효과는 다소 미미한 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 김수일, 박근보, 박성용, 서경범 (2006), “국내 지진규모를 고려한 중진 지역에서의 액상화 평가기법에 관한 연구”, *한국지진공학회 논문집*, 제10권, 제3호, pp. 125~134.
2. 배경태, 이종규 (2007), “연약지반의 쇄석다짐말뚝에 대한 거동 분석(I)”, *한국지반공학회 논문집*, 제23권, 제4호, pp. 169~183.
3. 해양수산부 (1999), *항만 및 어항시설의 내진설계표준서*, 한국해양연구소
4. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), *Design and Construction of Stone Column*, FHWA, pp. 37~38.
5. Fox, N. S. and Cowell, M, J. (1988), *Geopier<sup>TM</sup> Foundation and Soil Reinforcement Manual*, pp. 55~91.