

짧은 쇄석다짐말뚝(RAP)이 설치된 사질토지반의 응력변화 특성 The Characteristics of Various Stress in Cohesionless Soil with the Rammed Aggregate Pier

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 김경민²⁾, Kyung-Min Kim, 김준호³⁾, Jun-Ho Kim

¹⁾ 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 공학박사, Ph.D., Dept. of Civil Engineering, Graduate School, Hanyang University

³⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 공학석사, M.E., Dept. of Civil Engineering, Graduate School, Hanyang University

개요(SYNOPSIS) : RAP(rammed aggregate pier) method which is intermediate foundation of deep and shallow foundation is used to improve the ground with high compaction energy. This method is widely spread around the world, but there are few examples and systemic researches for failure mechanism and bearing capacity of this method are not organized yet.

In this paper, soil laboratory tests were carried out to evaluate the applicability of RAP method as the foundation of a structure. And the bearing capacity and the failure mechanism of RAP method were studied with respect to various relative densities(35%, 65%, 90%), diameters(45mm, 60mm) and lengths(20cm, 30cm, 40cm).

As results, stress concentration ratio decreased as diameter of RAP was increasing or length of RAP was decreased or relative density was decreased. however these results were not always constant. because systematic interaction between relative density and diameter and length of RAP can affect stress concentration ratio, more studies on stress concentration ratio are needed throughout laboratory and field tests.

주요어(Key words) : Rammed aggregate pier, Intermediate foundation, Failure mechanism, Bulging failure, Stress concentration ratio

1. 서 론

복합지반이란 광범위하게는 두 종류 이상의 지층이 함께 공존하는 지반의 상태를 말하며, 이는 자연적으로 형성된 자연적 복합지반과 인위적으로 형성한 인공적 복합지반으로 대별될 수 있다. 지층혼합형태의 규모가 크고, 대부분 오랜 시간 퇴적에 의해 횡방향으로 배치된 자연적 복합지반은 공학적인 안정성이나 사용성에 있어 발생하는 문제점에 대해 그 해결 방안이 제시되어 있는 반면, 인위적 복합지반은 이러한 문제점에 대한 신뢰성 있는 이론들과 해결방안들이 아직은 일반화되어 있지 않다고 할 수 있다.

우리나라는 지형특성상 삼면이 바다로 둘러 싸여 있고, 국토의 약 70%가 산악지형으로 구성되어 있어, 국토의 효율적인 이용에 대한 관심이 점차 증대되고 있으며, 해안지역의 개발을 위해 최근 인천 국제공항 건설, 서해안 고속도로 등 연약지반을 개량하는 대규모 국토개발사업이 시행되었다.

본 연구에서 제시한 짧은 쇄석다짐말뚝공법은 연약한 지반에 천공을 시행한 후 높은 다짐에너지를 이

용하여 쇄석을 다짐으로써, 원지반의 전단강도 및 지지력을 높이는 공법으로 깊은 기초와 얇은 기초의 중간개념이다. 1980년대 중반 미국에서 시작하여 미국 내 뿐만 아니라 필리핀, 인도, 말레이시아, 독일, 러시아 등 전 세계적으로 활용성을 넓혀가고 있으며(Fox, et al, 1988), 현재 국내에서도 이에 대한 연구 활동도 활발히 진행되고 있으나 복합지반의 적용사례가 많지 않고 본 공법 적용시 파괴 메커니즘 및 지지력에 대한 연구와 시공방법에 따른 보강효과에 대한 체계적인 연구는 이루어지지 않은 실정이다.

이에, 본 연구에서는 구조물 기초로서 복합지반(모형지반과 쇄석다짐말뚝)의 실내 모형실험을 통해 RAP 공법 적용시 모형지반의 상대밀도, RAP의 직경 및 길이에 따른 모형지반과 RAP의 응력집중비 및 지중응력의 변화 특성을 분석하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 RAP공법의 개요

짧은 쇄석다짐말뚝공법은 깊은기초와 얇은기초의 중간개념으로 직경 0.75m 내외, 깊이 2.0~7.0m의 굴착공을 천공한 후 바닥에 골재를 깔고 다짐으로써 구근을 형성하고 단계별로 골재 깔기 및 다짐을 반복 시행하여 말뚝을 형성하는 공법이다.

시공 중 다짐을 통해 구근을 형성하며 이것은 RAP를 따라 생기는 수평토압을 증가시켜 마찰전단저항을 증가시킨다. 일반적으로 RAP 내부마찰각의 범위는 48~52°이고 주변 흙의 강성은 시공 전 흙의 10~40배로 알려져 있다(Fox, et al, 2001).

2.2 RAP의 적용성

2.2.1 깊은 기초와 직접 기초의 대체

양질의 지반 위에 매우 큰 하중의 구조물이 놓이는 경우와 불량한 지반에 하중이 작은 구조물이 놓이는 경우 깊은기초 적용시 과다설계로 인해 비경제적이고 직접 기초 적용시 과도한 굴착과 치환이 이루어질 경우 비경제적일 수 있으므로 RAP 적용을 통해 이를 해결할 수 있다.

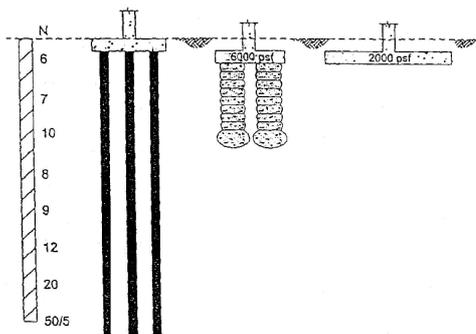


그림 1. 깊은 기초 대체

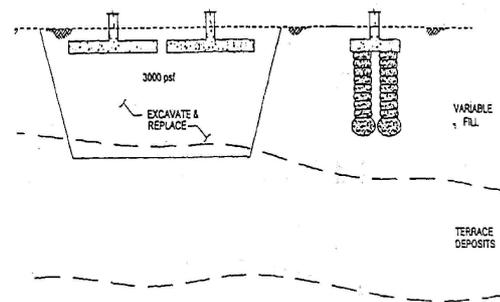


그림 2. 직접 기초 대체

2.2.2 사면안정과 부등침하 방지

사면 하단부에 발생하는 전단 파괴를 방지하기 위해 설치함으로써 전단 파괴에 대한 저항을 크게 하고 일반적인 탱크 구조물 하단부에 설치하여 부등침하를 방지할 수 있다.

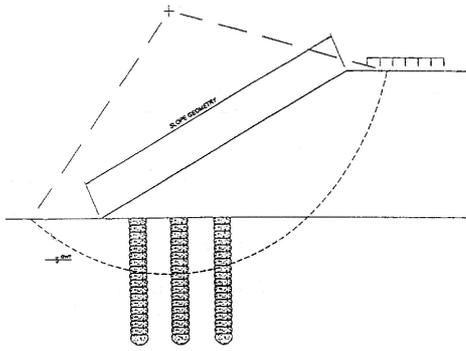


그림 3. 사면안정을 위한 억지말뚝



그림 4. 탱크 지지를 위한 말뚝

2.2.3 액상화 방지

RAP 설치를 통해 액상화 가능성을 감소시킴으로서 지진이나 충격에 의한 영향을 최소화할 수 있다.

2.3 RAP의 기본개념

2.3.1 등가원주

RAP 복합지반의 거동해석에 사용되는 기본 개념은 하나의 RAP가 분담하는 등가유효원주를 대상으로 한다.

등가원주의 직경은 아래 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$\text{정삼각형 배치일 때, } D_e = 1.05s \quad (1)$$

$$\text{정사각형 배치일 때, } D_e = 1.13s \quad (2)$$

여기서, s = RAP의 간격이다.

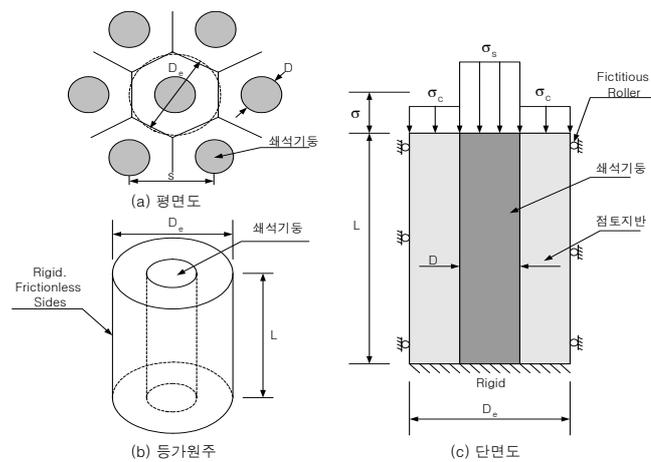


그림 5. 등가원주 개념도

RAP와 영향범위(tributary area)를 둘러싸고 있는 직경(D_e)를 가진 등가실린더(equivalent cylinder)를 등가원주(unit cell)이라고 한다.

2.3.2 면적치환비

RAP에 의해 치환된 지반의 체적은 개량 지반의 거동에 중대한 영향을 미친다. 지반의 치환 정도를 알기 위해 RAP의 영향면적(등가원주의 전체면적)에 대한 RAP의 면적의 비를 면적치환비(area replacement ratio, a_s)라고 정의하고 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$a_s = \frac{A_s}{A_s + A_c} = \frac{A_s}{A} \quad (3)$$

여기서, a_s : 면적치환비

A : 등가원주의 전체면적

A_s : 다짐 후의 RAP의 면적

A_c : RAP 면적을 제외한 남은 지반의 면적

남은 지반의 면적비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_c = \frac{A_c}{A_s + A_c} = \frac{A_c}{A} = 1 - a_s \quad (4)$$

여기서, a_c : RAP 면적을 제외한 지반의 면적비

면적치환비는 RAP의 직경과 간격을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a_s = C_1 \cdot \left(\frac{D}{S}\right)^2 \quad (5)$$

여기서, D : 다짐 후의 RAP의 직경

S : RAP의 간격

C_1 : RAP의 설치패턴에 따른 상수

- 정삼각형 패턴 : $C_1 = \pi/(2/\sqrt{3}) = 0.907$

- 정방형 패턴 : $C_1 = \pi/4 = 0.785$

2.3.3 응력집중비

상부 전단면에 걸쳐 균등한 하중이 작용하는 무한히 큰 그룹 RAP에서는 다음과 같이 가정된다. (단, 안쪽의 각각의 RAP는 그림 5(b)에 나타낸 등가원주로 가정됨).

- ① 쇄석다짐말뚝과 주변지반의 침하량은 같다.
- ② 등가원주의 수평방향력은 원주의 경계면에서 작용한다.

③ 등가원주의 경계면 외부에 작용하는 전단응력은 0이다.

④ 등가원주 저면은 강성지반에 놓여 있다.

위의 가정에 따라 등가원주의 상부에 작용하는 균등한 하중은 등가원주 내부에 남아있어야만 한다. 등가원주는 그림 5(c)와 같이 RAP의 주위에 대칭적으로 위치한 마찰이 없는 강성벽체를 가진 실린더 형태의 지반으로 모델링 될 수 있다.

RAP로 보강된 지반위에 제방이나 기초가 놓일 경우, RAP에 응력집중이 발생하여 RAP보다 강성이 작은 주변지반에는 RAP에 작용하는 응력보다 작은 응력이 작용한다(그림 5(c) 참조). 이는 RAP와 주변 지반의 수직 침하량은 같기 때문에, 주변지반(점성토 지반이나 느슨한 사질토 지반)보다 강성이 큰 RAP에 응력집중이 발생하게 되는 원인이다.

정방형이나 삼각형 유형으로 설치된 그룹 RAP에 상당히 넓은 상대적으로 균등한 하중이 작용할 경우 등가원주 개념이 유효하다면, 등가원주 내부의 수직응력 분포는 다음 식으로 정의되는 응력집중비(stress concentration ratio, m)로 표현할 수 있다(그림 5(c) 참조; NAVFAC, 1983).

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \tag{6}$$

여기서, m : 응력집중비

σ_s : RAP에 작용하는 응력

σ_c : 주변 점성토지반에 작용하는 응력

등가원주에 작용하는 평균응력(average stress, σ)은 수직방향의 힘의 평형으로부터 면적치환비를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s) \tag{7}$$

응력집중비를 이용하여 식 $\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s)$ 로부터 RAP에 작용하는 응력과 주변 점성토 지반에 작용하는 응력을 다음과 같이 유도해 낼 수 있다(배우석, 2001).

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{[1 + (m - 1) a_s]} = \mu_c \sigma \tag{8}$$

$$\sigma_s = \frac{m \sigma}{[1 + (m - 1) a_s]} = \mu_s \sigma \tag{9}$$

여기서, μ_c : 평균응력에 대한 주변 점성토 지반의 응력비

μ_s : 평균응력에 대한 RAP의 응력비

2.4 Bulging Failure에 대한 RAP의 지지력 이론

RAP를 Bulging Failure로 가정한 경우 극한지지력을 제안자별로 살펴보면 표 1과 같다.

표 1. Bulging Failure에 대한 RAP의 지지력 이론식

제안자	이론식
Gibson & Anderson(1961)	$q_u = [\sigma_{ro} + c_u \{1 + \ln \frac{E_c}{2c_u(1+v)}\}] \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Greenwood(1970)	$q_u = (\gamma_c z K_{pc} + 2c_u \sqrt{K_{pc}}) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Vesic(1972), Detry & Nagaraju(1975)	$q_u = (c_u F'_c + q_{avg} F'_q) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Hughes and Withers(1974)	$q_u = (\sigma_{ro} + 4c_u) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Brauns(1978)	$q_u = [\sigma_{ro} + \{1 + \ln \frac{E_c}{3 \cdot c_u}\} \cdot c_u] \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Madhav et al.(1979)	$q_u = (4c_u + \sigma_{ro} + K_o q_s) (W/B)^2 \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s} + [1 - (W/B)^2] q_s$
Hansbo(1994)	$q_u = (\sigma_{ro} + 5c_u) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$

3. 실험방법

3.1 대상시료의 특성

본 연구에서는 일반적으로 자주 접하는 입도가 불량한 모래(SP)를 이용하여 모형지반을 형성하였고, 쇄석의 크기는 현장에서 적용되는 RAP의 직경에 대한 쇄석의 직경비와 유사하도록 선별하였다.

표 2. 사질토의 물성치

물리적 성질	사질토
USCS(통일분류법)	SP
비중, G_s	2.637
$\gamma_{d \max}$ (tonf/m ³)	1.73
$\gamma_{d \min}$ (tonf/m ³)	1.54
최대 간극비, e_{\max}	0.712
최소 간극비, e_{\min}	0.524
균등 계수, C_u	3.72
NO.200 체 통과율 (%)	0

표 3. 쇄석의 물성치

물리적 성질	쇄석
USCS	GP
비중, G_s	2.38
$\gamma_{d \max}$ (tonf/m ³)	1.58
내부마찰각 ϕ (°)	49

3.2 실험준비

3.2.1 모형지반 조성 및 토압계의 위치

모형토조는 그림 6과 같이 두께 1cm, 직경 50cm, 높이 50cm의 아크릴로 제작한 후, 하중에 의한 토조의 파손을 방지하기 위하여 토조 외부를 철제틀로 보강하였고, 토압계는 깊이 10cm마다 수평·수직 방향으로 설치하였다. 모형지반은 상대밀도를 35%, 65%, 90%로 나누어 각각 조정하였다(표 4 참조).

표 4. 모형지반 상대밀도에 따른 물성치

상대밀도 $D_r(\%)$	단위중량 $\gamma_d (\text{tonf/m}^3)$	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$
35	1.60	31
65	1.66	34
90	1.71	39

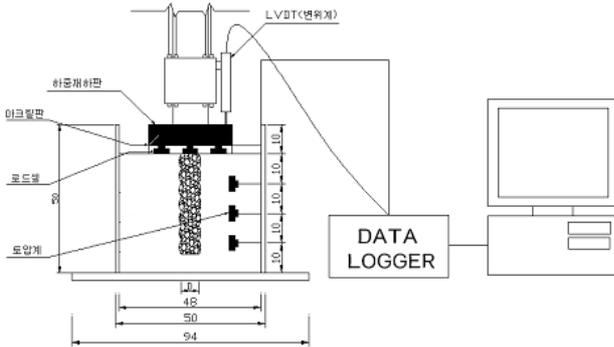


그림 6. 모형토조 및 토압계 위치

3.2.2 RAP 설치

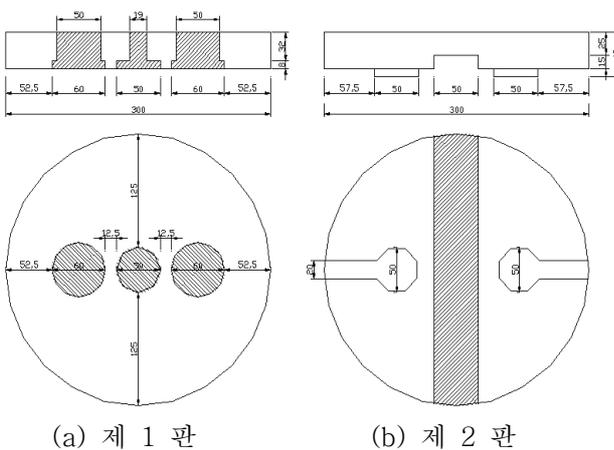
RAP의 설치는 모형지반 하부, 10cm, 및 20cm 높이에 케이싱을 설치하고 모형지반을 제작한 후, 공벽의 붕괴를 방지하기 위해 삽입된 케이싱을 일정간격으로 인발하며 쇄석을 다져 쇄석기둥을 형성하였으며, 인발시의 교란을 최소화하기 위해 케이싱을 그리스로 도포하였다.

실험시 케이싱 직경 45mm, 60mm에 대해 쇄석기둥의 강성을 일정하게 유지하기 위하여 단위중량이 동일하도록 RAP를 설치하였다.

RAP의 파괴 거동을 살펴보기 위하여 RAP 직경에 따른 설치 깊이별로 수평방향으로 토압계를 설치하여 하중이 증가에 따른 RAP의 거동을 살펴보았다.

3.2.3 아크릴판 제작

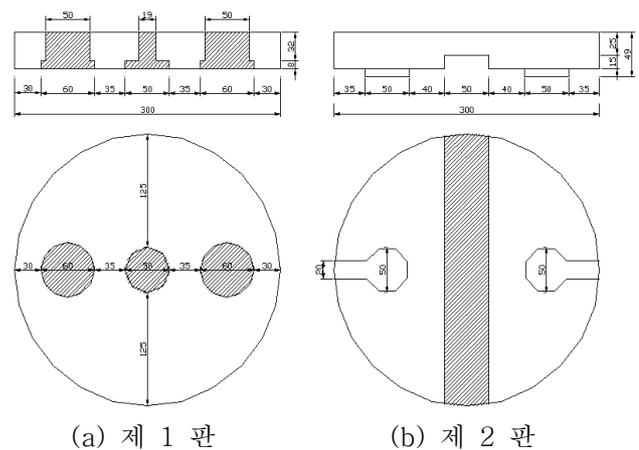
아크릴판($\phi : 30\text{cm}$, $t : 8\text{cm}$)은 하중 재하시 쇄석과 모형지반의 동시 밀착을 가능하게 하여 응력집중비 측정을 용이하게 하기 위해 제작하였다. 아크릴판은 두께가 4cm인 2개의 판으로 이루어져 있으며 제 1판은 로드셀의 위치(1.5D)를 고정하는 역할로서 로드셀이 아크릴판 내부에 위치하게 되며, 쇄석과 모형지반에 닿는 수감부만 노출이 되도록 하였고, 제 2판은 로드셀의 배선 처리를 용이하게 하는 역할을 한다. 쇄석 직경(45mm, 60mm)에 따른 아크릴판은 그림 7과 그림 8과 같다.



(a) 제 1 판

(b) 제 2 판

그림 7. 로드셀 위치 (RAP 직경 45mm)



(a) 제 1 판

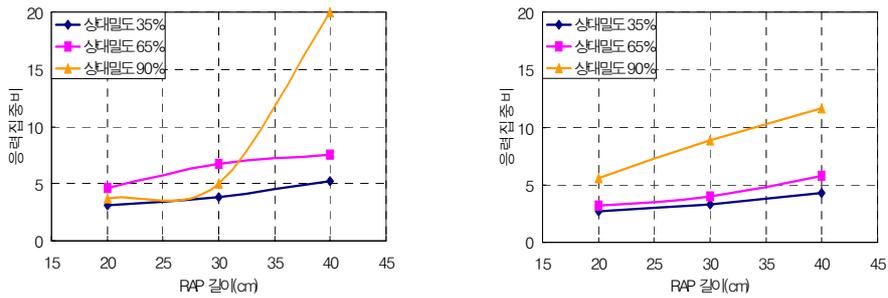
(b) 제 2 판

그림 8. 로드셀 위치 (RAP 직경 60mm)

4. 실험결과 분석

4.1 응력집중비

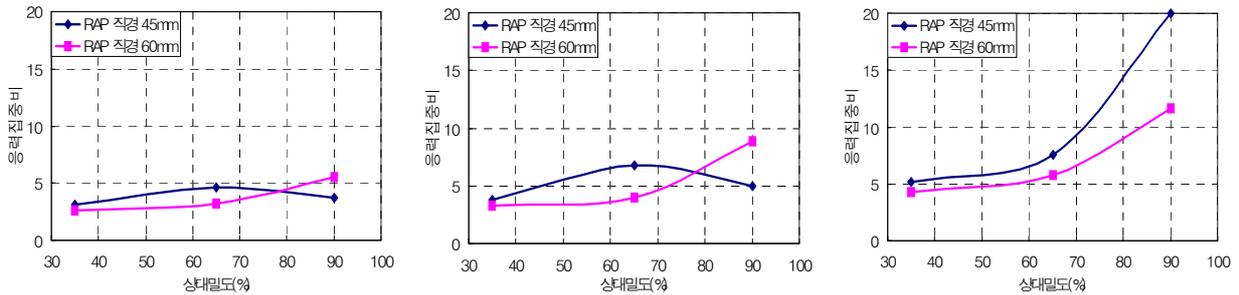
모형지반의 상대밀도(35%, 65%, 90%) 및 RAP 직경(45mm, 60mm)과 길이(20cm, 30cm, 40cm)에 따른 모형지반과 RAP의 응력집중비를 살펴보았다. RAP는 직경이 클수록 응력집중비가 감소하였고, RAP의 길이가 길수록 응력집중비는 증가하는 경향을 나타냈으며, 모형지반의 상대밀도가 증가함에 따라 응력집중비는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 항상 이런 경향을 나타내는 것은 아니며, 그 원인은 모형지반의 상대밀도와 RAP의 직경 및 길이가 독립된 작용이 아닌 유기적 상호작용을 통해 응력집중비에 영향을 미치기 때문으로 사료된다.



(a) RAP 직경 45mm

(b) RAP 직경 60mm

그림 9. RAP 직경 변화에 따른 응력집중비 변화

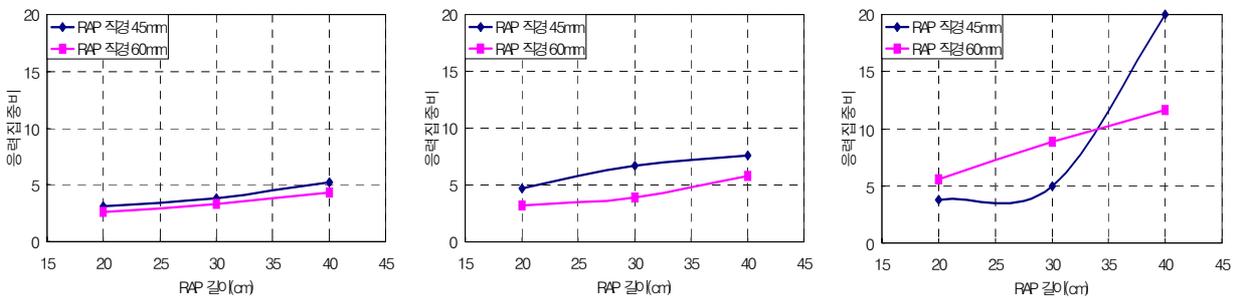


(a) RAP 길이 20cm

(b) RAP 길이 30cm

(c) RAP 길이 40cm

그림 10. RAP 길이 변화에 따른 응력집중비 변화



(a) 모형지반 상대밀도 35%

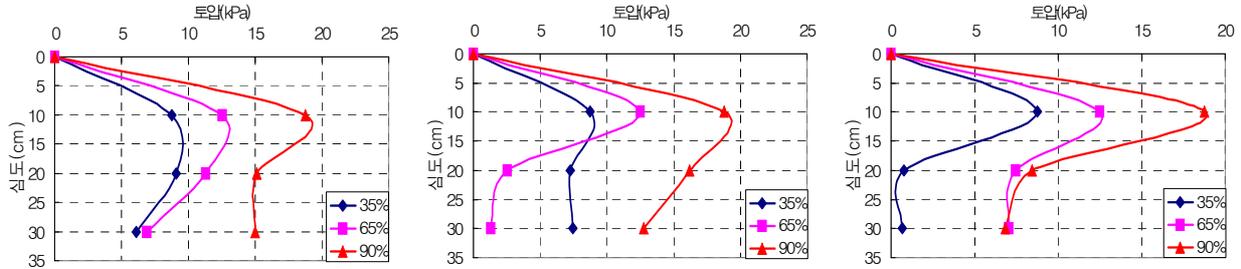
(b) 모형지반 상대밀도 65%

(c) 모형지반 상대밀도 90%

그림 11. 모형지반 상대밀도 변화에 따른 응력집중비 변화

4.2 깊이별 수평토압 분포

RAP 중심에서 1.0D 떨어진 곳에서의 깊이별 수평토압을 측정한 결과, 10~15cm에서 최대 수평토압이 작용하는 것으로 나타났고, 하부로 내려갈수록 수평토압이 줄어드는 경향을 나타내어 RAP 상부인 약 2.0~2.5D에서 bulging 파괴 특성을 나타낼 수 있었다(그림 12, 13 참조). 또한 주변 지반의 상대밀도가 클수록 수평토압이 크게 나타났으며 RAP의 길이의 변화는 수평토압에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

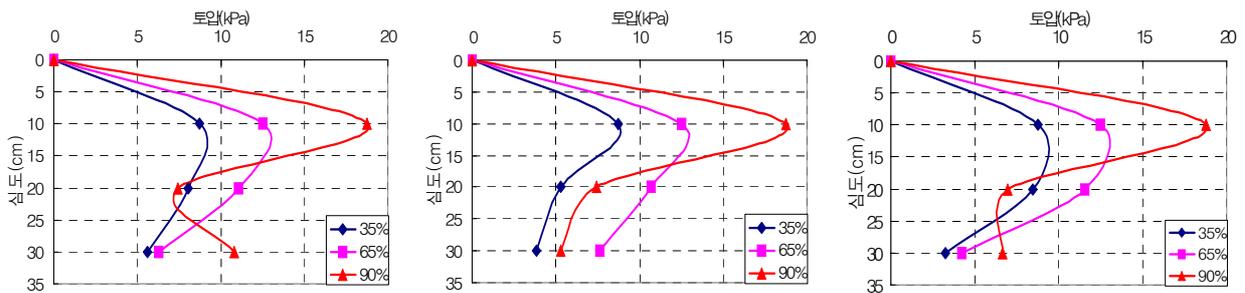


(a) RAP 길이 (20cm)

(b) RAP 길이 (30cm)

(c) RAP 길이 (40cm)

그림 12. 직경 45mm인 RAP가 설치된 심도별 수평토압



(a) RAP 길이 (20cm)

(b) RAP 길이 (30cm)

(c) RAP 길이 (40cm)

그림 13. 직경 60mm인 RAP가 설치된 심도별 수평토압

5. 결 론

본 연구에서는 모형지반의 상대밀도와 RAP의 직경 및 길이에 따른 모형지반과 RAP의 응력집중비 및 지중응력의 변화 특성을 파악하기 위해 실내모형 시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) RAP 직경이 클수록 수평토압 증가에 의해 모형지반의 강성이 증대되어 응력집중비가 감소하는 것으로 사료된다.
- 2) RAP의 길이가 증가할수록 쇄석과 모형지반의 마찰전단저항이 증대되어 응력집중비가 증가하는 것으로 사료된다.
- 3) 모형지반의 상대밀도가 증가할수록 응력집중비는 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 마찰전단저항의 증가가 수평 토압작용에 의한 모형지반의 강도 증가보다 크게 작용한 것으로 사료된다.
- 4) 본 실험에서는 모형지반의 상대밀도가 90%인 경우, 조건별 실험값들이 다른 경향을 나타냈으며, 이

는 한계간극비 개념에 의한 것으로 사료된다.

- 5) 길이가 40cm인 RAP는 상대밀도가 90%인 모형지반과 토조 밑바닥에 의한 구속압의 작용으로 급격한 응력집중비의 증가가 나타난 것으로 사료된다.
- 6) 모형지반의 상대밀도와 RAP의 직경 및 길이는 독립된 작용이 아닌 유기적 상호작용을 통해 응력집중비에 영향을 미치는 것으로 사료된다.
- 7) RAP 구근에 중심으로부터 1.0D 떨어진 곳에 깊이별로 수평방향으로 토압계를 설치한 결과, 상부에 위치한 토압계에서 수평토압이 크게 작용하여 RAP 상부에서 bulging 파괴 거동을 보이는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 배우석(2001), *쇄석말뚝으로 보강된 기초시스템의 지지력 및 침하 거동*, 박사학위논문, 충북대학교, pp. 1~36.
2. Fox, N. S. and Wissmann, K. and Lien, B.(2001), *Geopier Technical Workshop*, Geopier Foundation Company.
3. Gibson, R. E. and Anderson, W. F.,(1961), "In-situ measurement of soil properties with the pressuremeter", *Civil Engineering*, London, Vol. 56, pp. 615~620.
4. Greenwood, D. A.,(1970), "Mechanical improvement of soils below ground surface", *Proc. Ground Engineering Conference*, Institute of Civil Engineering, London.
5. Hansbo, S.(1994), *Foundation Engineering, Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier Press, Vol. 95, pp. 450~455.
6. Hughes, J. M. O. & Withers, N. J.(1974), "Reinforcing of soft cohesive soils with stone column", *Ground Engineering*, Vol. 7, No.3, May, pp. 42~49.
7. Madhav, M.R., Iyenger, N.G.R., Vitkar, R.P. and Nandia, A.(1979), "Increased Bearing Capacity and Reduced Settlements due to Inclusions in Soil", *Proc. Int. Conf. On Soil Reinforcement, Reinforced Earth and Other Techniques*, Vol. 2, pp. 239~333.
8. J. Brauns(1978), "Initial Bearing Capacity of Stone Columns or Sand Piles in Soft Ground", *Konferenzbeitrag zu Symp, on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice*, New South Wales/Australia
9. Naval Facilities Design Command(1983), *Design Manual DM 7.1~7.2*, NAVFAC
10. Vesic, A. S.(1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, ASCE, Vol. 98, SM3, pp. 265~290.