

# 중간기초개념으로서 짧은쇄석다짐말뚝의 지지력 특성에 관한 연구

천병식\* · 김경민\*\* · 김준호\*\*  
\*한양대학교 공과대학 토목공학과  
\*\*한양대학교 대학원 토목공학과

## A Study on the Bearing Capacity of Rammed Aggregate Pier as the Intermediate Foundations

BYUNG-SIK CHUN\*, KYUNG-MIN KIM\*\* AND JUN-HO, KIM\*\*

\*Engineering College, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

\*\*Graduate School, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

**KEY WORDS:** Rammed Aggregate Pier 짧은쇄석다짐말뚝, 중간기초 Intermediate Foundations, Bearing capacity 지지력, Failure behavior 파괴거동, Bulging failure 벌집파괴

**ABSTRACT:** To secure stability and availability of Rammed Aggregate Pier method as the foundation of a structure, the bearing capacity and failure behavior characteristics was studied through soil laboratory tests in a model ground. In this study, soil laboratory tests were carried out to find the applicability of RAP method as the foundation of a structure. And bearing capacity and the failure mechanism of RAP method was studied according to relative density(60%, 70%, 90%), diameter(45mm, 60mm, 70mm) of each pier and depth(5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm). Earth pressure cell is set up approach RAP and 1.0D space at RAP center. Bearing capacity and the failure mechanism of RAP is investigated by load test As a result, bulging failure was happened in 5~10cm(1.0D~2.0D) depth which the maximum lateral earth pressure is acting. Especially, diameter changing of RAP are in inverse proportion to the relative density and the lateral stress is very much influenced by the lateral earth pressure in every layer and tends to decrease according to depth.

### 1. 서 론

국내에서 쇄석말뚝공법은 현재 진동쇄석말뚝, 모래말뚝 등으로 구분되어 적용되고 있다. 모래말뚝은 연약지반에서의 배수 기능 및 일부 연약 사질토 지반 층의 액상화 방지 또는 지반보강 개념으로 오래 전부터 이용되어 왔다. 진동쇄석말뚝의 경우, 모래대신 쇄석을 이용하여 지반개량효과 및 침하 방지대책으로 개발되어 왔으나 실무에 적용한 사례가 전무한 실정이다. 해외의 경우, 모래말뚝 및 쇄석말뚝은 매우 다양하게 활용되고 있다. 진동쇄석말뚝의 경우, 쇄석을 진동 다짐하는 Vibrator가 쇄석말뚝의 상단에 위치하여 천공 Rod를 흔들며 다지는 국내의 진동쇄석말뚝과 달리 Vibrator가 말뚝선단에 놓여 쇄석투입과 동시에 하부에서 진동을 일으켜 다지는 Deep Vibrator방식을 사용하고 있어 국내에서 개발된 방식보다 훨씬 확실한 다짐 및 계획공경(Hole Diameter)을 형성할 수 있다.

한편, 짧은쇄석다짐말뚝(Rammed Aggregate pier, RAP)공법은 Vibrator가 아닌 Compaction을 이용하는 방법으로 현재 미국 Geopier사를 중심으로 미국 내 뿐만 아니라 필리핀, 인도,

말레이시아, 독일, 러시아 등 전 세계적으로 활용성을 넓혀가고 있다. 미국에서는 1989년 최초로 시공된 후 현재까지 300개가 넘는 구조물에 적용되어 안정성이 인정받은 상태이다. RAP공법은 단층 상업 또는 공업 건물에서 16층의 상업 구조물, 그리고 각각 2200kips의 Column하중을 지지하는 구조물에 이르기까지 침하량을 제어하기 위해 10년 이상 성공적으로 사용되어 왔다. 침하량 관리뿐만 아니라, RAP공법은 고속도로와 상업지구 용벽의 사면안정성을 증대시키고, RAP로 지지된 기초와 매트에 높은 수평하중 저항력을 제공하고, 용벽구조물과 건물 등에 인발력을 제공하는 데에 사용되어 왔다. 국내의 경우 그 적용사례가 없고, 재하 시험을 통한 설계지지력 확인 등의 계측 데이터가 조사된 경우도 없는 실정으로 인하여 실제 현장 적용을 위한 설계 시 구조 검토나 지지력 산정에 어려움을 겪고 있다. 이에, 본 연구에서는 RAP공법을 구조물 기초로서 사용하기 위해서 파괴거동을 단일 RAP에서 발생하는 벌집파괴와 RAP부재 선단아래의 전단파괴로 가정하여 실내모형실험을 수행하였다. RAP를 설치한 후 하중재하 실험을 수행하고, 지지력 이론식들과 현장시험시공을 통한 실측치를 비교 분석하여 지오피어의 지반보강효과를 파악하였으며 대형직접전단 시험을 통해서 RAP의 치환율과 원지반의 상대밀도에 따른 복합지반의 전단강도 특성을 검토하는 것이 본 연구의 목적이다.

제1저자 천병식 연락처: 서울시 성동구 행당1동 17번지 한양대  
02-2290-0326 hengdang@unitel.co.kr

## 2. 이론적 배경

### 2.1 RAP의 이론적 고찰

RAP공법은 깊은 기초와 얇은 기초의 중간개념으로 직경 0.75m 내외, 깊이 2~7m의 굴착공을 천공한 후 바다에 골재를 깔고 다짐으로서 구근을 형성하고 단계별로 골재갈기 및 다짐을 반복 시행하여 말뚝을 형성하는 공법이다.

시공 중 다짐을 통해 구근을 형성하며 이것은 RAP를 따라 생기는 수평토압을 증가시켜 마찰전단저항을 증가시킨다. 시공 후 일반적으로 RAP내부마찰각의 범위는 48~52°이고, 주변 흙의 강성은 시공 전 흙의 10~40배이다(Fig. 1, 2)(Fox. et al, 2001).

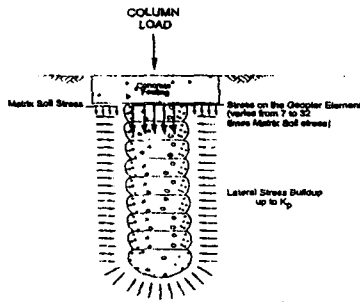


Fig. 1 Increase in lateral soil pressure along shaft increases frictional shear resistance

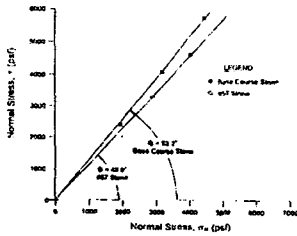


Fig. 2 Rammed Aggregate Pier angle of international friction ranges from 48 to 52 degrees

### 2.2 RAP의 파괴거동 메커니즘

단일 RAP부재와 군 RAP부재의 파괴 거동은 RAP를 설치하는 동안의 주변 흙의 응력상태, 재하된 푸팅, RAP보강 부재, 주변 흙 사이에 생기는 복잡한 하중전이 메커니즘으로 인해 매우 복잡하다. 이와 같은 복잡한 상호작용을 이해하기 위해 한계평형이론(Limit equilibrium theory)을 적용한다.

Fig. 3은 RAP로 보강된 푸팅이 한계평형파괴방식(Limit equilibrium failure modes)으로 되기 위한 파괴거동을 나타낸다(Wissmann. et al, 1999).

Fig. 3에서 각각의 경우에 대한 파괴거동을 보면 다음과 같다.

(1) 각각의 RAP 부재의 팽창파괴 : 주변 흙이 약하거나 상대적

으로 균질 할 경우 말뚝의 상단부(직경의 2~3배 정도의 길이)가 블록해지면서 파괴되는 팽창파괴가 발생한다(Fig. 3 A).

(2) RAP 부재 선단아래의 전단파괴(Fig. 3 B).

(3) RAP로 보강된 주변 흙 안의 전단파괴 : 견고한 지지층에 놓인 RAP는 지표면 부근에서 전반전단파괴가 발생한다(Fig. 3 C).

(4) RAP로 보강된 주변 흙 바닥면 아래의 전단파괴 : 강성이 있고 입도가 좋은 흙을 포함하는 지지층에서 전단파괴가 발생한다(Fig. 3 D).

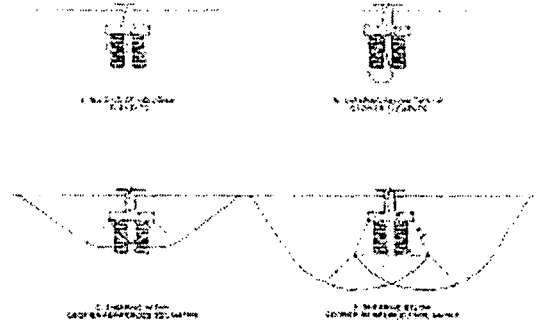


Fig. 3 Limit-equilibrium bearing capacity failure for RAP-Supported foundations

## 3. 시험

### 3.1 말뚝거동으로 가정된 하중재하시험

본 실험에서는 RAP의 지반보강효과를 파악하기 위하여 사진 토와 RAP의 침하를 동일하다고 보았고, 말뚝거동에 의한 파괴로 보고 실내시험을 실시하였다.

시험대상토는 주문진 표준사를 이용하여 실내모형토조를 형성하였다. 시험 전 시험대상토의 원지반 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 체분석시험, 전단시험, 상대밀도를 계산하기 위한 Limiting density test(ASTM standard)을 실시한 물성시험결과는 Table 1과 같다. RAP재료로 사용된 쇄석시료는 불순물의 제거를 위해 충분히 세척한 후 건조로에 건조하여 사용하였다.

Table 1 Change of the relative density and ultimate bearing capacity on compaction energy

Dr (%)	No. compaction	Compaction Energy E (kg · cm)	Ultimate Bearing Capacity (kPa)	Change of Dr(%)
80%	200	3600	210.4	82.2
	300	5400	340.7	83.5
	400	7200	390.5	85.8
	500	9000	645.3	86
	Original Ground			37.4

Table 2 Change of the relative density and ultimate bearing capacity on RAP diameter

Dr (%)	RAP dia. (mm)	Compaction energy E (kg · cm)	Ultimate bearing capacity (kPa)	Change of Dr (%)
	45	7200	182.8	81.6
80%	60	7200	390.5	85.8
	70	7200	491.4	86.4
	Original ground		37.4	-

Table 3 Change of the relative density and ultimate bearing capacity on compaction energy

Dr (%)	No. of Compaction	Compaction energy (kg · cm)	Compaction energy, $q_u$ (kPa)	Change of Dr (%)
60	300	5400	240.1	81.3
	400	7200	-	-
80	300	5400	340.7	83.5
	400	7200	390.5	85.8
90	300	5400	485.4	90.2
	400	7200	537.2	91.6

Table 4 Comparison of ultimate bearing capacity on Lab. test results and results of theory equations.

Dr (%)	No. of Compaction	RAP dia. (mm)	Measured bearing capacity on settlement basis (kPa)	Calculated bearing capacity(kPa)			
				Terzaghi-Busiman	Janbu (1976)	Vesic (1977)	Meyer-hof (1976)
80	400	60	210.4	341.8	407.4	647.6	701.0
			340.7	349.5	419.1	679.8	737.8
			390.5	371.5	446.2	734.4	798.5
	400	60	645.3	424.9	507.3	836.7	909.9
			242.7	354.7	424.3	685.07	743.0
			390.5	371.5	446.2	734.47	798.5
90	400	70	461.8	393.8	468.0	770.0	837.1
		390.5	371.5	446.2	734.4	798.5	
90			537.2	502.3	652.7	955.2	1056.1
60			240.1	219.0	265.3	410.4	404.3
80	300	60	340.7	349.5	419.1	679.8	737.8
90			485.4	459.7	591.8	870.7	961.7

3.2 벌징파괴거동으로 가정한 하중재하시험

사질토에 대해서 내부마찰각  $\phi'$ 와 한계응력  $\sigma_{rL}$ 과의 관계

에 이론적인 접근이 없다. 그러나, 사질토 지반에 대한  $\phi'$ 와 한계응력  $\sigma_{rL}$ 의 경험적인 관계식은 다음과 같다(Indian Geotechnical Society, 1992).

$$\sigma_{rL} = 2.5 \times 2 \times \frac{\phi' - 24}{4} \quad (1)$$

$\sigma_{rL}$ 의 단위는  $kN/m^2$ 이다. 식 (1)에 의해 표현된 관계는 Muller(1970)에 의해 인용되었다.

$$\sigma_{rL} = b \times 2 \times \frac{\phi' - 24}{4} \quad (2)$$

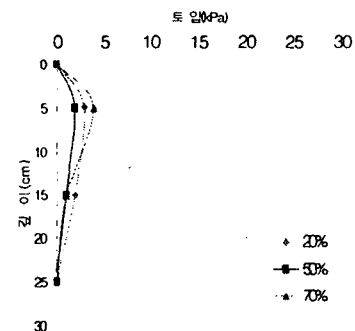
- b = 1.8 (균질한 젖은 흙)
- 3.5 (비탄소성 건조된 흙)
- 2.5 (평균)

사질토 지반에서의 13회의 압력실험 결과 식 2로부터 계산된  $\sigma_{rL}$ 의 초기한계응력의 값들은 Winter와 Rodriguez(1975, according Vesic 1972)에 의해 측정된 값과 가깝다.

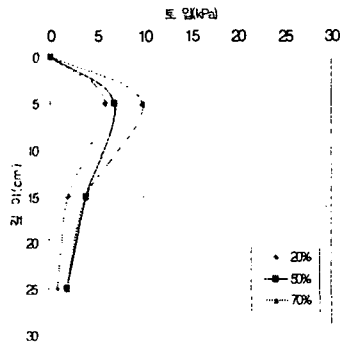
위의 이론식을 근거로 RAP의 극한지지력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_u = \sigma_{rL} \times K_p \quad (kN/m^2) \quad (3)$$

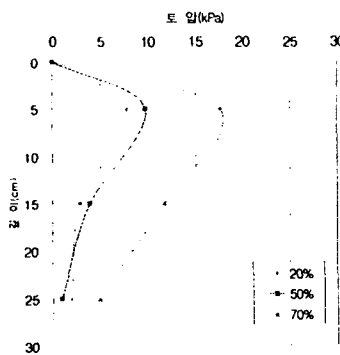
침하량 0.1d(d : RAP 직경) 기준으로 RAP 극한지지력을 결정하였을 때의 깊이별 수평토압 분포를 나타낸 것이다. 토압 분포를 깊이별로 비교했을 때 RAP 상부로부터 5cm 정도의 깊이에서 횡토압이 크게 작용하며 하부로 내려갈수록 토압이 감소하는 것으로 나타났다. 횡토압 양상이 RAP 상부에서 상대밀도의 크기에 따라 커지는 경향을 나타내고 있으며, RAP 하부에서는 일정한 경향을 파악할 수 없었으나, RAP 상단부에 횡토압이 크게 작용함으로써 벌징파괴가 예상되는 것으로 판단된다(Fig. 4, Table 5).



(a) d=45mm



(b) d=60mm



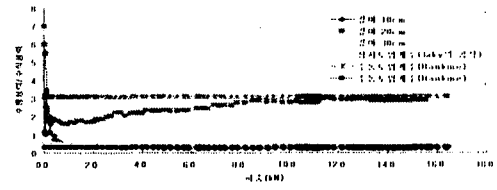
(c) d=70mm

Fig. 4 Distribution of lateral stresses for Dr(%) on settlement 0.1d basis(d=45mm)

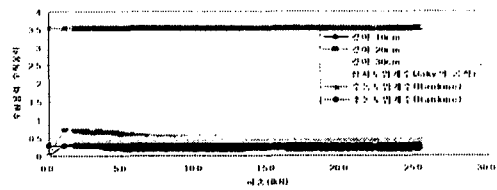
Table 5. Comparison of ultimate bearing capacity on change of settlement (on settlement 0.1d basis)(Tomlinson, 1986)

RAP dia. (mm)	Dr (%)	Bearing capacity on lab. tests(kPa)		Bearing capacity on theory(kPa)
		On settlement 0.1d basis	On lateral bearing capacity basis	
45	20%	39.6	100.0	50.1
	50%	61.4	174.5	75.1
	70%	105.3	246.6	125.2
60	20%	68.5	115.2	50.1
	50%	120.4	175.8	75.1
	70%	187.3	256.0	125.2
70	20%	100.0	93.3	50.1
	50%	164.3	144.2	75.1
	70%	280.0	254.3	125.2

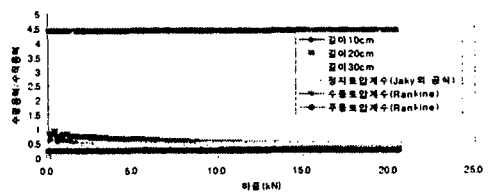
Fig. 5의 경우 수평응력과 수직응력의 비를 구한 결과 주변지반은 정지토압계수( $K_0=1-\sin\phi$ )보다 크고 수동토압계수(Rakine,  $\tan^2(45+\phi/2)$ )와 비슷하거나 작은 것으로 나타났다.



(a) Dr=35%



(b) Dr=65%



(c) Dr=90%

Fig. 5 Lateral stress to vertical stress ratio for change of Dr(RAP d=45mm)

### 3.3 대형직접전단시험을 이용한 복합지반 강도특성

대형직접전단시험에 관한 명확한 시험법이 정립되어 있지 않았으나 여러 문헌조사를 통해 조사해본 결과 대형직접전단시험의 시험과정은 직접전단시험의 시험과정과 같은 원리를 적용하여 실험되고 있다(Head, 1986). 따라서 기본적인 개념 및 시험과정은 직접전단시험을 기준으로 하였다(신동훈, 2000).

직접전단시험은 수평으로 분할된 전단상자에 시료를 넣고 일정한 수직력을 가한 후 수평방향으로 전단력을 가하면서 전단력, 수평변위, 연직변위를 측정하며 전단파괴를 발생시켜 그때의 수직응력과 전단응력에 관한 Mohr-Coulomb의 법칙에 의해서 흙의 내부마찰각( $\phi$ )과 점착력( $c$ )을 구하고, 필요에 따라 전단 중에 생기는 체적과 형태의 변화를 측정하여 흙의 변형에 관한 정수를 구한다(김상규, 1991).

대형직접전단시험장치는 일반 직접전단시험장치와는 달리 큰 하중을 낼 수 있는 유압 전자 제어시스템을 이용하여 아스팔트 및 토질, 쇄석 등의 전단시험에 적합하다. 또한 모형지반을 조성하여 지반의 전단강도 특성을 파악할 수 있으며, 수직하중만의 증가를 통해 실내 모형재하시험도 가능하다.

본 시험에 사용된 장비의 제원은 Tale 6, Fig. 6과 같다.

Table 6 Specification of large direct shear test

Size	2100mm(L) × 1700mm(W) × 1850mm(H)	
Max. compression	Horizontal	50ton
	Vertical	20ton
Hydraulic valve and controller	1~100mm/min	
Hydraulic pump	250kg/cm <sup>2</sup> 20ℓ	
Displacement gauge	Horizontal	200mm(0.02 mm)
	Vertical	100mm(0.02 mm)
shear box Size	d = 300mm	h = 350mm

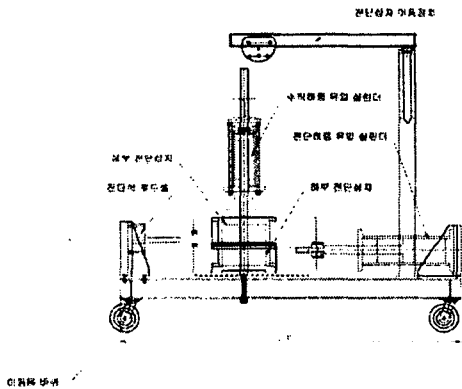


Fig. 6 Large direct shear test

본 실험의 모형지반조성에는 raining method가 사용되었다. 이 방법은 일정한 높이에서 일정한 눈금의 체를 통과하여 모래 입자를 자유낙하 시킴으로써 원하는 밀도의 지반을 얻게 된다. 이 때 얻어지는 지반의 밀도는 체의 눈금을 일정하게 유지할 경우 시료 입자의 자유낙하고에 비례하여 점차로 증가하나 일정 높이 이상이 되면 어느 한계값에 도달한다(이인모 등, 1993).

본 시험에서는 10번체를 사용했으며, 모래지반의 상대밀도를 RAP 성형전과 성형 후에 각각 시험하여 RAP 성형 후의 상대밀도를 14, 32, 50 %로 각각 맞추었다. RAP 성형 전 상대밀도 15%, 30%는 성형 후에 14%, 32%로 비슷한 값을 나타내었으나 RAP 성형 전 상대밀도 80%의 경우 성형 후에 50%의 상대밀도로 저하되는 결과를 보였다. 이는 Dense 지반에 RAP를 설치하는 과정에 주변 모래지반이 부풀어 오르는 현상 때문인 것으로 판단된다.

지표면의 높이가 200mm 증가할 때마다 높이를 조절하여 균일성을 유지하였다. 여러 번의 반복시험을 통해 상대밀도에 따른 낙하높이의 관계를 Table 7과 같이 찾을 수 있었다.

Table 7 Relative density on drop height

Dr(%)	Drop height (cm)	Unit weight $\gamma_d(t/m^3)$	Internal friction angle $\phi(^{\circ})$
14	3	1.439	22
32	15	1.491	28.1
50	25	1.544	31.2

모형지반 내부의 벽면은 평면변형을 조건을 위하여 Grease를 도포 후 비닐을 덮었으며 사용된 쇄석 재료는 불순물의 제거를 위해 충분히 세척한 후 건조로에 건조하여 사용하였다(천병식 등, 2002).

RAP의 설치는 모형지반에 미리 케이싱을 설치하고 상대밀도에 따른 모형지반을 조성한 후, 공벽의 붕괴를 방지하기 위해 삽입된 케이싱을 일정간격으로 인발하며 쇄석 재료를 넣었으며, 인발시의 교란을 최소로 하기 위해 케이싱을 Grease로 도포하였다.

RAP의 치환을 변화를 위해 케이싱의 직경(d)을 각각 134, 164, 190, 212mm로 하였으며, RAP의 높은 강성비를 일정하게 하기위해 건조단위중량 ( $\gamma_d$ )을 1.7t/m<sup>3</sup>으로 하여 RAP를 설치하였다. RAP 설치시 쇄석 재료가 미리 계산된 양에 못 미치거나, 중양에 설치되지 않을 경우 시험지반을 다시 조성하여 RAP를 재설치하였다.

Table 8에서 보는 바와 같이 시험치와 가중평균법은 상대밀도에 따른 전단강도의 증가가 뚜렷하다. 그러나 평균전단강도법 이론치의 경우 전단강도의 증가 경향이 명확치 않다. 이것은 역시 원지반의 상대밀도에 따른 전단강도의 증가를 고려 못하는 평균전단강도법의 한계로 판단된다.

또한 원지반의 상대밀도가 30% 이하인 매우느슨(0%<D<sub>r</sub><15%), 느슨한(15%<D<sub>r</sub><35%) 지반의 경우 이론치가 실측치 보다 크게 예측되는 것으로 나타났으며 그림 5.23에 나타내듯이 치환율 50%인 고치환율의 경우 평균전단강도법은 상대밀도 35% 까지도 이론치가 시험치 보다 0.4~4t/m<sup>2</sup> 정도 큰 값을 예측하는 것으로 나타났다.

Table 8 Comparison of lab. test results and theory's equation results( $\sigma = 2kg/cm^2, \theta = 0, m = 3$ )

Dr of original ground (%)	Replace ment ratio of RAP $a_s$ (%)	Shear strength of composite d ground $\tau$ (t/m <sup>2</sup> )	Results of weighted average method, $\tau$ (t/m <sup>2</sup> )	Results of average shear strength method, $\tau$ (t/m <sup>2</sup> )
14	20	9.11	11.51	10.81
14	30	10.59	13.23	14.19
14	40	12.74	14.94	16.82
14	50	14.21	16.66	18.93
32	20	15.07	13.59	10.81
32	30	16.66	15.05	14.19
32	40	17.39	16.50	16.82
32	50	18.59	17.96	18.93
50	20	16.78	14.74	10.81
50	30	18.07	16.05	14.19
50	40	19.52	17.36	16.82
50	50	20.64	18.67	18.93

## 4. 결 론

본 연구에서는 사질토지반에서의 RAP의 지반보강효과를 연구하기 위하여 RAP의 다짐에너지 및 영향반경 결정, 지지력 특성 및 침하특성 등의 공학적 특성을 비교 분석하였다. 그 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

(1) 다짐에너지를 변화시켜 심도별, 거리별로 토압계에 작용한 응력을 비교한 결과, 다짐에너지 7200 kg·cm(다짐횟수 400번)이 가장 효과적인 것을 알 수 있었으며 영향반경이 6cm 내외 일 것으로 판단된다.

(2) 재하시험에 사용되는 재하판 지름의 10%(침하량 15mm)를 기준으로 극한 지지력을 측정된 결과, 다짐에너지 7200 kg·cm(다짐횟수 400번)이 효과적인 다짐에너지임을 보였고 RAP의 침하량 저감효과가 큰 것으로 나타났다. RAP의 지름이 45, 60, 70mm 높아짐에 따라 원지반에 비해 극한지지력이 크게 증가하였으며 상대밀도에 따른 극한지지력을 비교해 본 결과 상대밀도 60%의 경우에는 다짐횟수 300회(다짐에너지 5400 kg·cm)가 효과적인 다짐에너지인 것으로 나타났다.

(3) 모형지반의 상대밀도 변화를 측정해 본 결과, 다짐횟수 200, 300, 400, 500으로 증가할수록 상대밀도가 증가하였으며, PVC의 지름이 45, 60, 70mm로 증가할수록 또한 상대밀도가 증가하는 경향을 보였다. 주변지반의 상대밀도가 60, 80, 90%로 증가할수록 상대밀도가 증가하는 폭이 감소하였으며 이것은 주변지반의 상대밀도가 조밀할수록 상대밀도 변화의 폭이 작아지는 것으로 판단된다.

(4) 말뚝으로 가정한 RAP 부재 선단하부의 전단파괴에 대해서 이론식(Terzaghi-Buisman)을 이용한 극한 지지력 산정 결과, 이론적인 극한지지력이 전침하량 기준으로 측정된 극한지지력보다 대체적으로 작은 값을 보임을 알 수 있었으며, 이것은 모형지반의 내부마찰각과 RAP 하부선단에서 모형토조의 최하부까지의 거리가 영향을 미치는 요소임을 보여주고 있다.

(5) Terzaghi-Buisman, Janbu(1976), Vesic(1977), Meyerhof(1976)의 선단 지지력 제안식들을 이용한 극한지지력 산정 결과, Vesic과 Meyerhof을 이용한 값이 매우 큰 경향을 나타냈으며 Terzaghi-Buisman식을 이용하여 구한 극한지지력이 전침하량 기준 측정지지력과 가장 잘 부합한다고 판단된다.

(6) RAP 구간에 중심으로부터 1d, 1.5d 떨어진 곳에 깊이별로 토압계를 설치한 결과 상부에 위치한 토압계에서 횡방향 토압이 크게 작용하였고 깊이가 깊어질수록 토압이 작아지는 것으로 보아 벌징파괴거동을 보이는 것으로 판단된다.

(7) 전단강도는 매우느슨, 느슨, 중간지반에서 치환율의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 원지반의 상대밀도가 증가

함에 따라서 전단강도도 증가하였는데, 그 증가폭이 매우느슨한 지반에서 가장 크게 나타났다. 이는 RAP의 전단강도 보강효과가 매우느슨한 지반에서 더욱 효과적이라는 사실을 뒷받침한다.

(8) 모형토조를 통한 하중재하시험과 상대밀도시험 결과 사질토 지반에서 지반보강을 위해 RAP의 활용이 가능할 것으로 판단되며, RAP의 토목공사에서의 폭넓은 적용을 위해서 점토와 풍화토 같은 다른 지반에서 많은 실내모형시험 및 현장시험시공이 실시되어 다양한 현장여건이 충분히 반영되어 조사·검토되어야 한다. 특히, 현장시험시공시 하중재하시험은 기존의 이론식들이 극한지지력에 의해 제안되었으므로 반드시 극한지지력까지 시험을 하여야 하고, 이론치와 실측치의 비교를 통해 RAP의 지반보강효과를 파악하여야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 김상규(1991), "토질역학 -이론과 응용-", 청문각, pp. 172~173.
- 신동훈(2000), "필댐축조용 암석재료의 대형직접전단시험", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 375~378.
- 이인모, 이정학, 임병석, 이명환(1993), "모형실험을 통한 말뚝지지력의 평가 및 치 수효과의 비교분석", 한국지반공학회지 제 9권 4호, pp. 37~44.
- 천병식, 정헌철(2002), "모래다짐말뚝의 모래대체재로서 동슬래그의 활용", 한국지반공학회 논문집, Vol. 18, No. 5, pp. 195~207.
- Fox, N. S., Wissmann, K. J. and B. H. Lien(2001), *Geopier<sup>®</sup> Technical Workshop*, Geopier<sup>TM</sup>.
- Head, K. H.(1986), *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 2, pp.240~243.
- Indian Geotechnical Society(1992), "Geotechnical Engineering", Indian Experiences, pp. 364~371.
- Tomlinson, M.J.(1986), *Foundation Design and Construction*, Fifth Edit., Longman Scientific & Technical, pp.104~143.
- Wissmann, K. J., Lawton, E. C., and Farrell, T. M.(1999), *Technical Bulletin No. 1, "Behavior of Geopier-Supported Foundation System During Seismic Events."* Geopier Foundation Company, Inc. Scottsdale, Arizona.