

# 복합지반의 침하에 대한 영향인자의 평가

## Evaluation of the Influence Factor on the Settlement of Composition Ground

김 방 식<sup>1)</sup> · 배 우 석<sup>†</sup>

Kim, Bangsik · Bae, Wooseok

**ABSTRACT** : Stone columns is the ground improvement method which composed of compacted gravel or crushed stone inserted into the soft ground consisting of loose sand and clay. There are many difficulties in quantitative analysis of soil-pile interaction because settlement behavior of stone columns is affected by various parameters. In this study, various parameters of behavior of end-bearing group piles are investigated by load tests. Finally, the improved characteristics of soft ground and the influence of design parameters are investigated in this study using PR (performance ratio) value. From the PR value calculation and test results, we know that settlement behavior of stone columns is affected by area replacement ratio of composite ground, diameter of column rather than embedment ratio and mat.

**Keywords** : Stone columns, Settlement, Performance ratio, Area replacement ratio

**요 지** : 쇄석말뚝은 느슨한 사질토지반이나 점토지반에 치환법에 의해 다져진 자갈이나 쇄석을 연약한 지반에 삽입하여 개량하는 공법이다. 쇄석말뚝 공법은 흙과 말뚝 접촉면에서 압밀거동이 다양한 인자에 의해 영향을 받게 되어 정량적인 해석에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 재하시험을 통해 선단지지 군말뚝의 거동에 대한 다양한 인자의 영향을 조사하였다. 궁극적으로 연약지반의 개량 특성과 설계인자의 영향력을 PR값을 사용하여 평가하였다. 실험결과와 계산된 PR 값으로부터 쇄석말뚝의 침하거동이 근입비나 매트 설치여부 보다는 말뚝의 직경이나 복합지반의 치환율에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

**주요어** : 쇄석말뚝, 침하, PR값, 면적치환율

## 1. 서 론

서남해안을 중심으로 시행되는 건설공사는 현재 양호한 부지의 확보가 매해 어려워지는 실정으로 고함수비 점토지반이나 각종 매립지, 준설지반 등 연약지반에서의 공사가 증가하고 있으며 이에 따라 관련 기초/보강 공사에 대한 관심도 높아지고 있다. 조립질다짐말뚝(*granular compaction piles*)공법은 모래 또는 점토로 된 연약지반에 모래, 자갈, 쇄석 등의 조립질 재료를 압입하여 큰 직경의 말뚝을 조성하는 지반개량공법이며 사용하는 재료에 따라 모래다짐말뚝(SCP), 조립토다짐말뚝(GCP), 쇄석말뚝(SC) 등의 여러 가지 공법으로 사용되고 있다. 일반적으로 조립질말뚝공법은 느슨한 모래지반에서는 지지력 증가, 액상화 방지, 수평저항력 증가 등의 목적으로 사용되고, 연약한 점성토 지반에서는 강성이 크고 압축성이 작은 조립질 재료의 말뚝 구조체로 연약한 원지반을 치환함으로써 지반의 지지력 증가와 침하량의 감소 및 압밀 배수 촉진에 의한 지반개량

효과가 있는 공법으로 알려져 있다(Bergado, et al., 1996). 국내에서는 조립질 말뚝공법중 주로 모래를 이용한 모래다짐말뚝이 많이 사용되고 있으며 최근에는 자갈이나 쇄석을 이용한 조립토 다짐 말뚝공법의 시공이 증가하고 있는 추세이다.

쇄석말뚝(*stone columns*) 공법은 연약지반 개량공법의 일종으로 다양한 지반에 적용이 가능하여 작은 하중의 기초와 연약지반상의 성토, 가스/유류탱크 등의 기초공법으로 경제적인 적용이 가능하다. 그러나 쇄석말뚝으로 보강된 복합지반은 압밀-침하 특성이 다양한 인자에 의해 영향을 받으므로 기초지반과 말뚝체의 상호작용을 정량적으로 평가하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 합리적인 설계와 예측을 위해서는 쇄석말뚝과 기초지반의 경계면에서 발생하는 수평저항력에 영향을 미치는 인자들에 대해 정성적 결과뿐 아니라 정량적 결과에 대한 평가가 필요하다.

Alamgir(1996) 등은 기둥의 간격, 탄성계수비, 흙의 포아슨비를 변화시켜가며 여러 가지 경우에서 실험하고 말

1) 정희원, 충주대학교 토목공학과 교수

† 정희원, 청주대학교 토목환경공학과 전임강사(E-mail : wsbae@cju.ac.kr)

뚝간격과 탄성계수비, 포아송비의 영향에 대해 밝힌 바 있으며, 국내에서는 천병식 등(2003)이 주요 설계파라미터들이 지지력에 미치는 영향을 예측이론 별로 비교한 결과를 발표하였다. 또한, 김홍택 등(2004)이 모형실험을 통하여 지지력의 관점에서 재하면적, 말뚝길이, 설치간격의 영향을 평가하였으며, 배우석 등(2006)은 원심모형실험을 통하여 연성재하를 재현하고 치환율과 재하방법, 배열이 지반의 응력에 미치는 영향을 평가하였다. 그러나 지금까지 대부분의 연구는 지지력의 관점에서 수행되어 왔으며 침하의 관점에서 그 영향력을 분석한 연구는 미진한 상황이다.

따라서 본 논문에서는 쇄석말뚝으로 보강된 복합지반에 대해 장기압밀실험과 모형재하실험을 실시하여 기초시스템의 하중-침하 관계를 분석하였다. 또한 실험결과를 이용하여 침하의 관점에서 제안된 이론의 적합성을 고찰하였으며, 기초시스템의 침하 특성을 분석하여 복합지반의 침하거동에 영향을 미치는 인자를 확인하였다.

## 2. 복합지반의 침하예측기법

쇄석말뚝의 지지력 및 침하에 영향을 미치는 인자들의 정량적인 평가를 위하여 Meyerhof(1997)는 쇄석말뚝-매트 시스템의 전달하중과 침하비를 제안하였다. 이론의 전개를 위해 말뚝과 지반의 기하학적 선형성을 가정하였고 소변형 이론이 적용되었으며, 탄성계수  $E_s$  와 포아송비  $\nu$ 의 재료 선형성을 가정하였다.

주변형을  $d_1\epsilon$ 은 탄성 성분과 소성 성분의 두 가지 주된 성분을 가지고 있다. 탄성성분은 주로 작아서 무시할 수 있으며 소성성분은 잠재적 기능  $\varphi$ 에 의해 유도되며 항복량에 의존하는 크기를 이용하여  $f$ 에 의해 표시될 수 있다.

$$d\epsilon_1 = h(\eta) \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1} < df > \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 잠재요소로 응력변수의 하나이며,  $\eta = \sigma_1/\sigma_3$ 이고  $\varphi$ 와  $f$ 는  $\varphi = \sigma_3 \varphi(\eta)$ ,  $f = \eta$  와 같다.

따라서,  $\partial \varphi / \partial \sigma_1 = \varphi'(\eta)$ ;  $df = d\eta$ 이므로 식 (1)은 식 (2)와 같다.

$$d\epsilon_1 = h(\eta) \varphi'(\eta) d\eta \quad (2)$$

식 (2)는  $\epsilon_1 = \epsilon_1(\eta)$  를 증명하기 위해 적분되었으며 이 관계의 역, 즉

$$\eta = \eta(\epsilon_1) \quad (3)$$

와 같으며 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$d\epsilon_3 = h(\eta) \varphi(\eta) - \eta \varphi'(\eta) d\eta \quad (4)$$

또한,  $\epsilon_3 = \epsilon_3(\eta)$ 이므로 식 (3)에서

$$V = \epsilon_1(\eta) + 2\epsilon_3(\eta) = V(\eta) = V[\eta(\epsilon_1)] = V(\epsilon_1) \quad (5)$$

그러므로, 쇄석말뚝의 응력-변형률특성은 식 (6), (7)과 같은 두 가지의 식으로 표현된다.

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \eta(\epsilon_1) \quad (6)$$

$$V = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 = V(\epsilon_1) \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_1$ 는 최대주응력,  $\sigma_3$ 는 최소주응력,  $\epsilon_1$ 은 축변형,  $\epsilon_3$ 는 횡방향 변형,  $V$ 는 각각의 쇄석말뚝에 대한 체적변형률이다.

식 (8)에 나타난 최소주응력  $\sigma_3$ 는 두 구성요소의 합이다. 첫 번째 요소는 말뚝-지반의 경계면에 작용하는 하중에 의한 것이며, 다음으로 말뚝의 자중에 의해 측방으로의 팽창된 값과 시공시의 다짐에 의해 발생하는 잔류 응력 요소에 의한 측방 팽창을 고려하여야 한다. 그러므로

$$\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 + \sigma_{res} \quad (8)$$

여기서, 불교란 상태에서는  $\sigma_{res} = 0.5K_0\gamma'L$ ,  $K_0$ 는 정지토 압계수,  $\gamma'$ 은 흙의 유효단위중량,  $L$ 은 말뚝의 길이이다.  $\bar{\sigma}_3$ 는 깊이에 따라 일정한 값을 갖는다고 가정하였다.

연약지반에 가해지는 하중  $p$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$p = \frac{(1-\nu)E_s}{1-3\nu^2-\nu} \left[ \epsilon_1 - \frac{2\nu}{1-\nu} \frac{a^2}{b^2-a^2} \epsilon_3 \right] \quad (9)$$

$$\sigma_3 = \frac{\nu}{1-\nu} p - E_s \epsilon_3 \frac{(1+\nu)a^2 + (1-\nu)b^2}{(1-\nu^2)(b^2-a^2)} \quad (10)$$

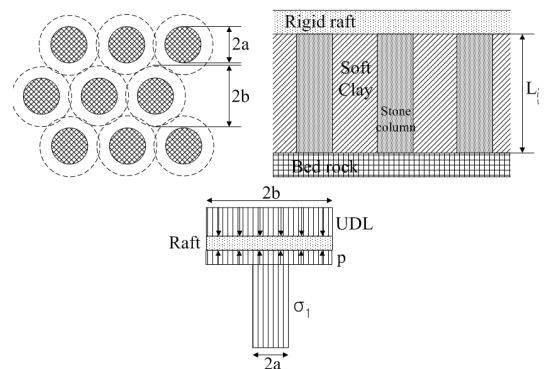


그림 1. 군말뚝의 기본개념(Meyerhof, 1997)

최종적으로 raft 기초위에 등분포로 작용하는 하중에 매트 지중을 합쳐 UDL(uniformly distributed load)로 정의하고, 매트 수직방향 평형조건을 다음과 같이 정의하였다.

$$UDL = \frac{a^2\sigma_1 + (b^2 - a^2)p}{b^2} \quad (11)$$

여기서,  $a$ 는 말뚝의 반경이며  $b$ 는 각 셀의 영향 반경이고  $p$ 는 연약지반에 가해지는 하중이다.

주어진 하중 UDL하에서  $\epsilon_1, \epsilon_3, \sigma_1, \sigma_3, \bar{\sigma}_3, p$ 와 같은 미지 변수가 존재하며, 미지수 중에서도 기초의 침하  $\delta$ 가  $L\epsilon_1$ 으로 표현되므로  $\epsilon_1$ 이 가장 중요한 인자임을 알 수 있다. 따라서 시행착오법에 의한 비선형적 과정으로 미지변수인  $\epsilon_1$ 를 가정하여 역해석에 의해 작용하중과 침하에 따른 UDL의 산정이 가능하다.

PR(performance ratio)값은 동일한 하중 하에서 말뚝과 지반이 포함된 보강지반과 보강되지 않은 지반의 침하비로 정의할 수 있으며, 침하비(settlement ratio)라 부르는 다른 계수는 보강된 지반에 대한 무보강지반의 침하의 비로 표현할 수 있다. 따라서 PR과 SR은 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$Performance\ ratio = (settlement\ ratio)^{-1} \text{ or } PR = 1/n \quad (12)$$

Meyerhof는 식 (13)에 대한 이론적인 해석을 통하여 PR값이 침하량과 쇄석의 내부마찰각, 파괴 변형율의 함수임을 밝혀내고 다음과 같이 PR값을 제안하였다.

$$PR = \frac{\delta}{H} \cdot \frac{E'}{UDL} \quad (13)$$

여기서,  $\delta$ 는 기초시스템의 침하량,  $H$ 는 연약층의 깊이,  $E'$ 은 포아송비의 효과를 고려하여 수정된 탄성계수이다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 시료의 특성

본 연구에서는 실트질 성분을 많이 포함하고 있는 충남 당진 지역의 해성점토를 이용하였다. 대상시료는 통일분류 법상 저소성 점토에 속하며 35~38%의 함수비와 30~34%의 액성한계를 보이고 6.5~8.0의 소성지수를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 실험에 사용된 쇄석 시료는 현장에서 적용되는 원형 쇄석말뚝의 직경에 대한 쇄석 시료의 직경비와 유사하도록 선별하고 비교적 양호한 입도분포를 가질 수 있도록 쇄석을 분쇄하여 사용하였다.

채취된 시료는 액성한계의 1.5배의 함수비로 재성형하여 혼합하고 0.074mm 체를 통과시켜 원지반 내에 포함되어 있는 유기질이나 불순물을 제거하였다. 재성형된 시료는 일정한 압력하의 토조내에서 7일간 예비압밀하여 소정의 지반강도(17~22kPa)를 획득하도록 하였다.

#### 3.2 실험장치 및 방법

단위 셀 압밀실험을 위해 제작된 실험장치는 측방향 변위를 억제하기 위하여 5mm 두께의 아크릴로 제작하였으며, 지름 100mm, 높이 150mm로 제작하였고 실험 몰드의 상·하부는 지반의 배수를 위하여 다공질판을 설치하였으며 상부에는 물의 공급 및 배수를 위한 밸브를 설치하였다.

가압은 레귤레이터(regulator)를 이용하여 일정한 공기압이 공급되도록 조절하였으며 공기압은 air bag을 통하여 지반에 전달하도록 제작하였다. 반력은 충분한 강도를 지닌 말뚝을 이용하여 상·하부의 프레임을 연결하여 발휘되도록 하였으며, 공기압과 간극수의 손실을 방지하기 위하여 몰드와 상·하부 프레임의 사이에 고무막을 설치하였다. 강성재하 조건을 위하여 동일한 재질의 원형 재하판을 사용하였으며, air bag과 벽면의 마찰을 최소화하기 위하여 그리스를 도포하였다.

실험에 사용된 재하시험장치는 크게 재하장치와 조절기로 이루어져 있으며, 균재하시 작용하중이 증대되므로 기

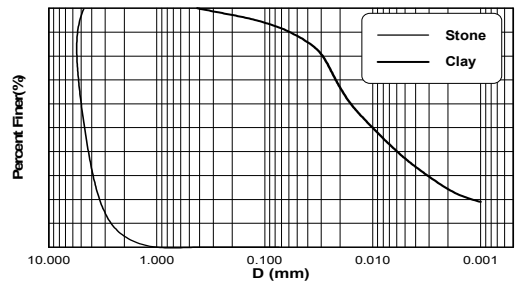


그림 2. 대상시료의 입도 분포곡선

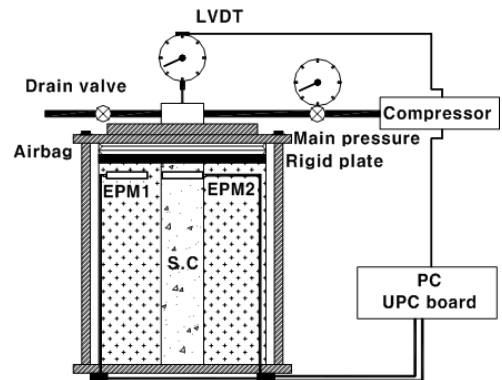


그림 3. 원통형 압밀시험장치

초로 사용될 강성재하판의 변형을 억제하고 하중의 분산을 위하여 충분한 강성을 지닌 2mm 두께의 강재를 겹쳐 사용하였다.

모델박스는 20×48×30(B×L×H)cm로 일정강도의 스테인레스로 제작하였으며, 실험 후 말뚝의 변형을 관찰하기 위해 앞부분의 벽체가 분리되도록 제작하였고 누수로 인한 변화가 없도록 고무막을 삽입하였다. 모형토조의 벽면은 그리스가 도포되었으며, 압밀시간을 단축하기 위해 바닥면에 모래층을 포설하였고 응력집중에 의한 지반의 응력변화를 방지하기 위해 측면배수는 제외하였다.

실험 시 하중과 침하량은 각각 load cell과 LVDT를 이용하여 data logger에 의해 취득되었으며, 재하는 변위제어가 가능한 모터를 사용하였고 재하와 제하, 속도의 제어가 가능하도록 조절장치를 부착하였다.

말뚝의 배치는 시공 시 인접말뚝의 시공으로 인한 정확한 말뚝지름의 유지와 재하실험상의 편이성을 위하여 사각형 배치를 적용하였으며, 말뚝의 배치간격과 영향원 지름을 동일하게 가정하여 설계하였다. 쇄석 균말뚝 실험은 지지력에 미치는 각 인자의 영향을 파악하기 위하여 일정 비배수 전단강도 범위내에 존재하는 지반을 대상으로 실시되었다.

말뚝의 지름은 치환율에 따라 1.8~5.5cm로 변화시켜 수행하였으며, 균말뚝의 시공을 위하여 예압밀된 지반에 미리 위치를 정한 후 천공을 실시하였다. 천공은 치환율에 따라 강제로 만들어진 케이싱을 이용하였으며, 천공 시 주변 마찰로 인한 교란을 최소화하기 위해 그리스를 도포한 후 시행되었다. 또한, 일정한 단위중량의 말뚝을 조성하기 위하여 천공된 지반의 중량을 측정하였으며, 일정량의 쇄석을 다져 넣은 후 다시 중량을 측정하여 말뚝의 단위중량을 확인하였다. 천공과 다짐은 시공에 의한 용기를 최대한 방지하기 위하여 중심부로부터 외측 방향으로 설치하였다.

실험은 말뚝의 설치 간격에 따른 영향과 파괴거동을 고

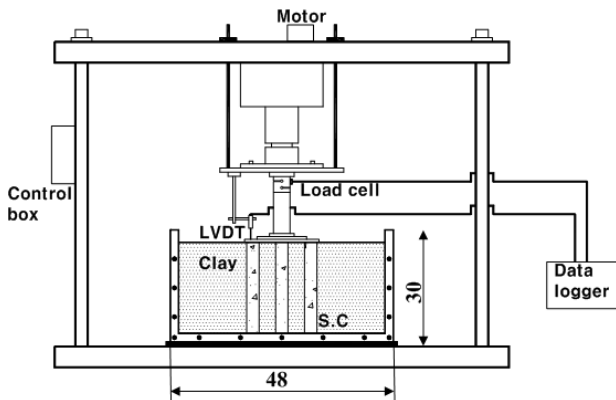


그림 4. 지지력 시험장치

찰하기 위하여 재하판의 면적에 대한 치환율을 기준으로 말뚝의 중심간 거리(s)를 각각 ∞, 6.8, 5, 4, 3.2cm(치환율  $a_s = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ )로 조절하여 설치하였으며, 말뚝의 본수는 치환율에 따라 3×3, 4×4, 5×5가 적용되었다.

말뚝의 설치 시 천공 후와 다짐 후 중량을 측정하여 일정한 단위중량을 유지하였으며 근입비에 따른 변화를 평가하기 위하여 Hu(1997)가 적용한 바 있는 단(短)말뚝과 장(長)말뚝의 근입비인 H/D=6, 10을 기준으로 실험을 실시하였다. 실험은 동일한 조건하에 이루어질 수 있도록 지반의 강도에 주의하였으며 동일한 간격을 적용하였다.

또한 균말뚝의 경우 아칭현상을 유발하여 말뚝으로의 응력집중을 증대시키는 것으로 알려져 있는 지반 상부의 매트(土)의 유·무에 따른 영향을 파악하기 위하여 상부에 두께 10mm의 매트를 일률적으로 시공하였다. 매트(土)에 적용된 입자의 크기는 말뚝과 동일한 분포의 시료를 사용하였으며 일정한 다짐도의 유지를 위하여 중량법을 이용하였고 설치 전·후의 중량을 측정하여 관리하였다.

재하의 변형률 재하조건에 의하여 2mm/min의 속도로 재하 되었으며 최대변위가 30mm까지 발생하도록 조절하였다. 균말뚝에 영향을 미치는 인자에 대한 검증(土)을 위하여 시행된 실험은 다음과 같으며, CT는 단위셀압밀시험, FT는 단말뚝재하시험을 GP는 균말뚝재하시험을 의미한다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 단위 셀 압밀시험 결과

본 연구에서는 균말뚝 재하실험으로부터 산정된 PR값의 적용성을 검증하기 위하여 산정된 값을 각각의 하중단위에 대한 단위 셀 압밀실험 결과나 장기침하예측값과 비

표 1. 실내모형시험 상세

실험 번호	$a_s$ (%)	D (cm) H/D	Mat 설치 여부	실험 번호	$a_s$ (%)	H/D 근입비	Mat 설치 여부
CT1	0	-	-	GP4	0.3	10	X
CT2	0.1	3.2	-	GP5	0	-	○
CT3	0.2	4.5	-	GP6	0.1	6	○
CT4	0.3	5.5	-	GP7	0.2	6	○
FT1	0	-	-	GP8	0.3	6	○
FT2	0.1	5.0	-	GP9	0	-	○
FT3	0.2	6.7	-	GP10	0.1	10	○
FT4	0.3	8.2	-	GP11	0.2	10	○
GP1	0	-	X	GP12	0.3	10	○
GP2	0.1	10	X	GP13	0.4	10	○
GP3	0.2	10	X				

표 2. 최종침하량의 비교(unit: cm)

실험	적용 하중	실험 결과	Asaoka	PR값 (오차율)
CT1	100	7.92	8.07	-
	200	12.24	12.49	-
	250	13.64	13.96	-
CT2	100	6.87	7.15	5.31(22.8)
	200	9.94	10.17	8.20(17.5)
	250	11.02	11.21	9.14(17.1)
CT3	100	4.33	4.30	3.64(15.9)
	200	6.75	6.71	5.63(16.6)
	250	7.4	7.35	6.27(15.2)
CT4	100	3.05	2.99	2.53(16.9)
	200	4.75	4.66	3.92(17.5)
	250	5.01	4.91	4.37(12.9)

교하였다. 복합지반의 침하량 예측은 동일하중에 대한 무보강지반의 침하량에 PR값을 곱하여 침하량을 산정하는 Meyerhof(1997)의 방법을 이용하였다.

평가결과 CT 1~CT 4의 경우 치환율이 증가함에 따라 침하량이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 모형실험 결과와 12~17% 정도의 오차를 보여주고 있다. 또한, 쇄석 말뚝의 장기침하량예측에 비교적 적합성을 보이는 Asaoka 법에 의한 결과(신방웅, 2000)와 11~20%의 오차를 나타내고 있어 PR값에 의한 침하평가는 정량적인 부합성을 보이고 있지는 않으나 하중의 증가에 따라 10~12%의 증가 경향을 나타내고 치환율의 증가에 따라 30~33%의 감소 경향을 나타내어 정성적인 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 예측 침하량은 하중단계가 높아질수록 근접한 결과치를 보이고 있음을 알 수 있었다.

쇄석말뚝에 대한 평가는 지금까지 지지력의 관점에서 이루어져 왔으나 침하관점에서 평가하는 것이 합리적이라는 주장이 제기되어 왔으며 Meyerhof(1997)는 동일한 하중하에서 복합지반과 무보강 지반의 침하를 평가하여 침하비의 역수로 PR값을 제시하고 쇄석말뚝에 영향을 미치는 인자를 정량적으로 평가한 바 있다. 따라서, 본 논문에서도 단위셀압밀시험을 통하여 정성적인 가능성을 발견하여 쇄석말뚝의 거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 평가를 위하여 실내재하시험을 통해 산정된 하중-침하 관계를 이용하여 PR값을 산정하고 비교하였다.

## 4.2 재하시험 결과

### 4.2.1 단일말뚝

동일 하중 단계에서 보강 지반의 침하량에 대한 무보강 지반의 침하량의 비로 복합지반의 침하를 평가하기 위하

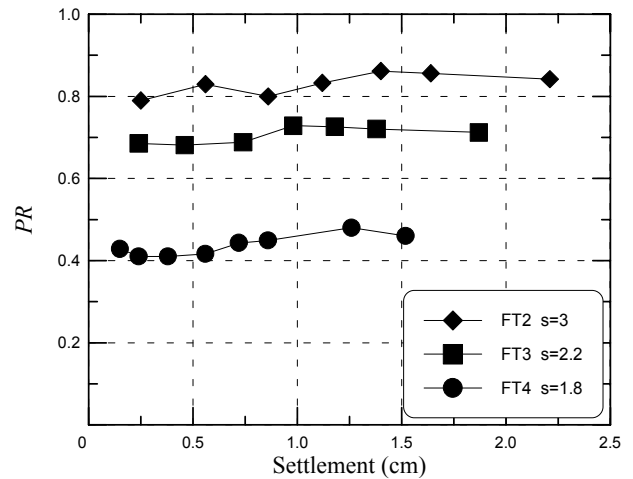


그림 5. PR에 대한 말뚝 직경의 영향

여 단일 말뚝의 재하시험 결과(FT)를 이용하였으며 말뚝 성형 시 다짐의 불균일성과 단위 셀 실험상의 제약으로 정확한 거동의 해석은 다소 미진하였으나 영향 인자에 대한 정성적인 양상은 검토가 가능하였다.

단일말뚝 재하시험의 경우 그림 5와 같이 말뚝의 직경이 증가함에 따라 PR값이 0.82에서 0.42로 감소되어 동일 하중하의 침하량이 일정하게 감소되는 경향을 나타내므로 복합지반의 침하가 쇄석말뚝의 지름에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

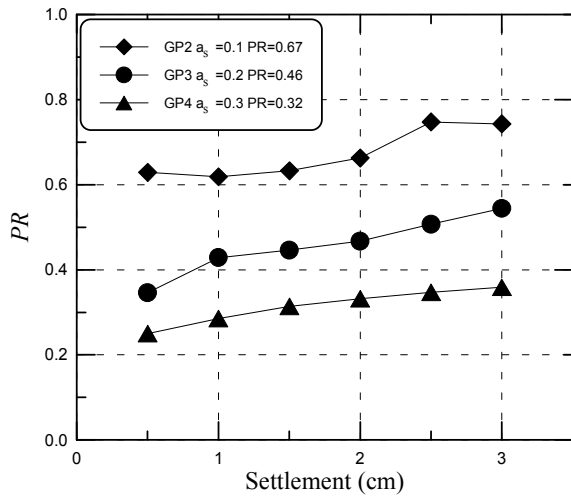
### 4.2.2 군말뚝

매트에 의해 전달되는 하중인 UDL은 매트에 작용하는 등분포하중의 크기와 매트와 자중을 합한 값으로 표현하며 실험에 의한 하중-침하 관계를 이용하면 PR값은 하중에 따른 변형률 관계의 함수임을 알 수 있으며 실험을 통해 산출한 결과는 그림 6과 같다.

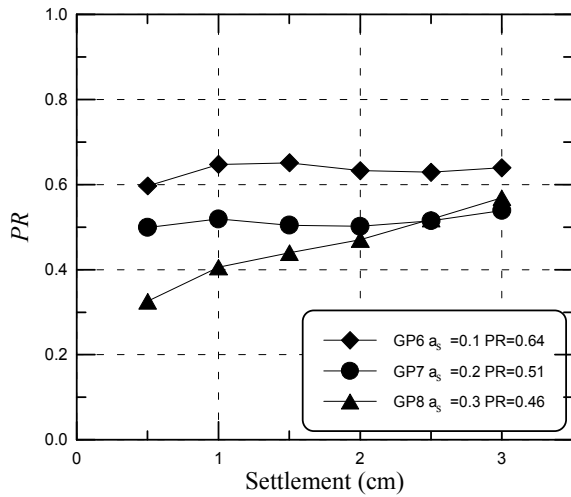
그림 6, 표 3과 같이 PR값은 침하량이 증가됨에 따라 거의 유사한 값을 나타내고 있으며 치환율이 증가함에 따라 감소하여 연약지반의 치환에 따른 침하감소효과를 확인하였다.

PR값은 단말뚝(GP 6~GP 8)의 경우 말뚝간의 간격이 축소됨에 따라 각각 36, 49, 54%, 장말뚝(GP 10~GP 13)의 경우 48, 58, 61, 77% 정도의 침하감소를 보이고 있다. 따라서 말뚝의 간격(치환율)이 쇄석말뚝-매트 기초의 침하에 중요한 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.

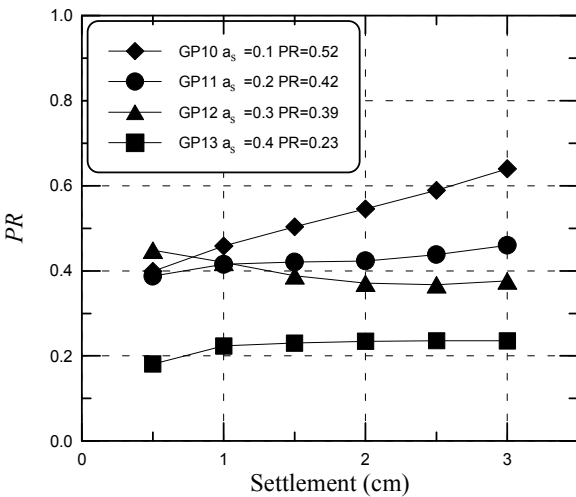
그림 7은 기초의 침하에 근입깊이가 미치는 영향을 파악하기 위하여 동일 치환율에 대한  $H/D = 6, 10$ 의 PR값을 비교한 것으로 Meyerhof(1997)의 주장과 같이 동일 간격비하에서 동일한 PR값을 나타내고 있지는 않으나, 근입비가 2배 증가하는 경우 침하 감소율이 7~12% 정도로 비



(a) Test GP 2~GP 4



(b) Test GP 6~GP 8



(c) Test GP 10~GP 13

그림 6. PR에 대한 면적치환율의 영향

교적 작은 것으로 나타나고 있다. 따라서 말뚝의 근입비가 쇠석 균말뚝의 침하 특성에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다.

표 3. 치환율에 따른 PR값의 변화

$a_s$	0.1	0.2	0.3	0.4
장말뚝 PR(GP 2~GP 4)	0.67	0.46	0.32	-
단말뚝 PR(GP 6~GP 8)	0.64	0.51	0.46	-
장말뚝 PR(GP 10~GP 13)	0.52	0.42	0.39	0.23

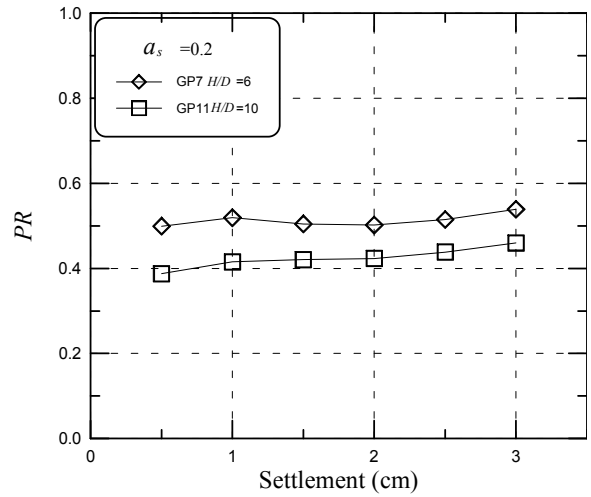


그림 7. PR에 대한 근입비의 영향

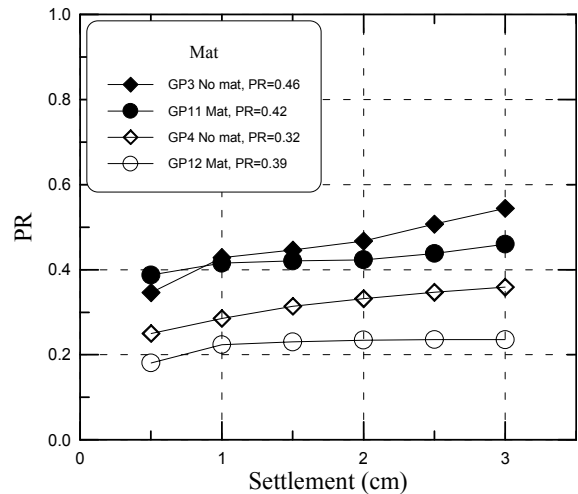


그림 8. PR에 대한 쇠석매트의 영향

그림 8은 매트의 설치여부에 따른 변화를 분석하기 위해 GP 3, 4, 11, 12에 대한 PR값을 비교한 것으로 각각 0.46, 0.32, 0.42, 0.39을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 매트의 설치 여부에 따라 비교적 유사한 값을 보여 침하의 감소에 미치는 매트의 설치여부의 영향이 다른 인자에 비해 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 부등침하나 지지력의 증대를 목적으로 하지 않고 단순히 배수로의 역할을 수행하거나 단순한 아칭효과를 기대하여 매트를 설치하는 경우 기초시스템의 침하에 매트의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

단, 본 논문에서는 매트 두께를 0.4D 정도로 하였으나 향후 매트의 역할을 증대시켜 말뚝 지름에 대한 매트의 두께 영향을 고려한 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

이상과 같은 분석을 통하여 쇄석말뚝-매트 시스템의 기초 침하하는 재하 시 기초의 축방향 변형률에 밀접한 관계가 있으며, 무보강 침하량에 대한 보강지반의 기초의 침하량 예측 시 PR값이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, PR값에 영향을 주는 인자에 대한 분석 결과 40% 이하의 치환율(간격비=1.4~2.7)에서는 말뚝의 간격비와 말뚝의 직경이 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 말뚝의 근입비와 배수재로써 시공된 매트의 영향은 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다.

## 5. 토의 및 결론

본 연구에서는 쇄석말뚝으로 보강된 기초시스템의 침하 거동을 규명하기 위하여 말뚝의 근입비 및 치환율, 매트의 조건에 대한 재하실험을 수행하고 기존 이론식과 실험결과를 통해 그 영향을 비교·분석하였다.

- (1) 산정된 PR값은 모형실험 결과와 Asaoka법에 의한 결과에 대해 11~20%의 오차를 나타내고 있어 정량적인 부합성을 보이고 있지는 않으나 치환율과 하중의 증가에 따른 경향성은 상관성을 보여 복합지반의 침하에 영향을 미치는 인자에 대한 정성적인 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) PR값은 동일 조건하에서 침하량이 증가됨에 따라 거의 유사한 값을 나타내고 있으며, 치환율이 증가함에 따라 단말뚝의 경우 각각 36, 49, 54%, 장말뚝의 경우 48, 58, 61, 77%의 침하감소를 보이고 있어 연약지반의 치환에 따른 침하감소효과를 확인하였고 치환율이 쇄석말뚝-매트 기초의 침하에 중요한 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.
- (3) 동일 치환율에 대한  $H/D = 6, 10$ 의 PR값을 비교한 결과 근입비의 증가율에 비해 침하 감소율이 7~12% 정도로 비교적 작은 것으로 나타나 말뚝의 근입비가 쇄석 근말뚝의 침하 특성에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다.
- (4) 매트의 설치여부에 따른 PR값을 비교한 결과 비교적 유사한 범위의 값을 보여 침하의 감소에 미치는 매트의 영향이 다른 인자에 비해 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서 부등침하나 지지력의 증대를 목적으로 하지 않고 단순히 배수로의 역할을 수행하거나 단순한 야칭효과를 기대하여 매트를 설치하는 경우 기초시스

템의 침하는 매트의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

- (5) 실내실험과 분석을 통하여 쇄석말뚝-매트 시스템의 기초 침하는 재하 시 기초의 축방향 변형률에 밀접한 관계가 있으며, 무보강 침하량에 대한 보강지반의 기초의 침하량 예측 시 PR값이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 40% 이하의 치환율에서는 말뚝의 간격비와 말뚝의 직경이 침하감소에 큰 영향을 미치며, 말뚝의 근입비와 배수재로써 시공된 매트의 영향은 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다.

쇄석말뚝에 대한 평가는 지금까지 지지력의 관점에서 이루어져 왔으나 실험결과를 통하여 PR값이 쇄석말뚝의 거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 평가에 정성적인 가능성이 있음을 발견하였고 향후 다양한 실내실험과 현장시험을 통하여 검증한다면 정량적인 예측도 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 1차년도 충주대학교 대학구조개혁지원사업비의 지원을 받아 수행한 연구로 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김홍택, 강운(2004), 모형실험에 의한 조립도 다짐말뚝의 하중 침하 관련 거동특성 분석, *한국지반환경공학회논문집*, 제5권 제4호, pp. 33~45.
  2. 배우석, 오세욱, 신방웅(2006), 모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 거동에 관한 원심모형실험, *대한토목학회논문집*, 제23권 제4호, pp. 249~257.
  3. 신방웅, 배우석(2000), 쇄석말뚝으로 보강된 연약지반의 침하 거동, *한국지반환경공학회논문집*, 제1권 제1호, pp. 27~34.
  4. 천병식, 김원철, 조양운, 서덕동(2003), 단일 쇄석다짐말뚝 지지력 산정시 주요 설계 파라메타에 대한 민감도 분석, *한국지반환경공학회 학술발표회논문집*, 한국지반공학회, pp. 275~283.
  5. Alamgir, M., Miura, N., Poorooshasb, H.B. and Madhav, M.R. (1996), Deformation Analysis of Soft Ground Reinforced by Columnar Inclusions, *Computers and Geotechnics*, Vol. 18. No. 4, pp. 267~290.
  6. Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N. and Balasubramanian, A. S.(1996), *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments*, ASCE Press, New York, pp. 186~233.
  7. Hu, W., Wood, D. A. and Stewart, W.(1997), Ground Improvement Using Stone Column Foundations: Result of Model Tests, *International Conference on ground Improvement Techniques*, pp. 247~256.
  8. Meyerhof, G. G. and Poorooshasb, H. B.(1997), Analysis of Behavior of Stone Columns and Lime Columns, *Computers and Geotechnics*, Vol. 20, No. 1, pp. 47~70.
- (접수일: 2007. 3. 15 심사일: 2007. 3. 16 심사완료일: 2007. 4. 20)