

# 쇄석말뚝으로 보강된 연약지반의 침하거동

## Settlement Behavior of Soft Ground Reinforced by Stone Columns

신방웅\* · 배우석\*\*

Shin, Bang-Woong · Bae, Woo-Seok

### Abstract

Stone columns is ground improvement method which is composed of compacted gravel or crushed stone inserted into the soft ground consisting of loose sand and clay by replacement method. Generally stone columns are constructed in silty clay, above 70% replacement rate for increasing the bearing capacity and shear strength. Low replacement stone columns method is limited below 30% at replacement rate-premising strength increase of clay ground is estimated efficiently. This study, laboratory model tests were conducted to investigate the consolidation drainage promotion and shear strength increase effect in soft ground with replacement rate by stone columns. The settlement reduction effect and settlement reduction coefficients increase with increasing the replacement rate in composite ground. The results of model tests indicate that consolidation promotion effect is proved. The increasing strength of composite ground was verified by vane shear tests.

**Keywords** : Stone columns, Consolidation, Replacement rate, Settlement reduction coefficients

### 요 지

쇄석말뚝 공법은 다져진 자갈, 폐석, 쇄석 등을 이용하여 느슨한 사질지반이나 연약점성토 지반을 개량하는 공법으로 일반적으로 말뚝은 70%이상의 치환율로 실트질 점토에 시공되어 지지력을 증진시키는 공법이나 말뚝을 배수층으로 압밀에 의한 점성토의 지반의 강도 증가를 전제로 치환율을 30% 이하로 억제하는 저치환 공법의 효율에 관한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 쇄석말뚝의 치환율에 따른 단일 등가원주 모형 실험을 실시하여 쇄석말뚝이 연약지반의 압밀거동에 미치는 영향을 분석하였다. 실험결과 치환율의 증가에 따른 침하감소효과와 침하저감계수를 산정하였으며 복합지반의 압밀시간 단축을 확인하였다. 또한, 복합지반에 대한 이론식을 이용한 장기침하량 예측을 통해 보강지반의 침하억제 경향을 평가하고 베인전단시험을 통해 복합지반의 강도증가 특성을 확인하였다.

**주요어** : 쇄석말뚝, 압밀, 치환율, 침하감소계수

### 1. 서론

쇄석말뚝(stone columns)은 쇄석이나 잡석, 폐건설골재 등을 이용하여 지반의 침하를 방지하고 지지력을 증진시키는 공법으로 공극수압의 소산효과로 인해 지진이 많이 발생하는 지역의

액상화현상에 대한 대책방안으로 많이 시공되고 있는 공법이며, 연약한 점성토 지반과 매립지반의 과잉침하를 방지할 수 있는 공법으로의 현장 적용성도 확인되고 있다.

현재 쇄석말뚝공법은 실트질 점토 지반에서 쇄석말뚝에 의한 지지력 및 전단강도의 증가 효과를 고려하여 70%정도의 고치

\*정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

\*\*충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

환율을 주로 적용하고 있으나, 최근 공법의 경제성, 조립재의 부족 등을 배경으로 쇄석말뚝을 배수층으로 압밀에 의한 점성토의 강도 증가를 전제로 치환율을 30% 정도로 억제하는 저치환율 공법의 효율에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히, 저치환율의 쇄석말뚝공법은 조립재를 배수층으로 압밀배수 촉진, 압밀침하 감소 및 압밀에 의한 강도 증가에 효과가 있는 것으로 평가되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 쇄석말뚝이 연약지반의 압밀거동에 미치는 영향을 배수촉진 효과 및 강도증가 효과를 실내모형실험을 통해 공학적으로 구명하고 기존의 이론식을 통하여 장기침하량 및 잔류침하량을 산정하여 침하억제효과를 확인하였다.

## 2. 복합지반의 침하예측기법

쇄석말뚝 공법은 일반적으로 등간격으로 타설된 쇄석말뚝과 원지반이 상재하중을 분담하는 것으로 단일 말뚝의 하중 분담을 단일등가원주모형(unit cell) 개념으로 해석한다.

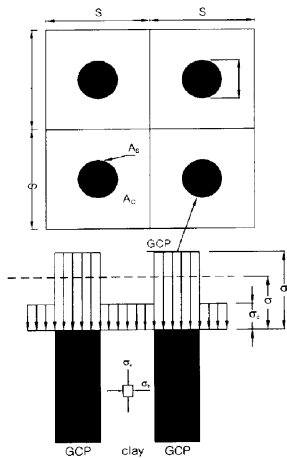


그림 1. 쇄석말뚝의 개념도

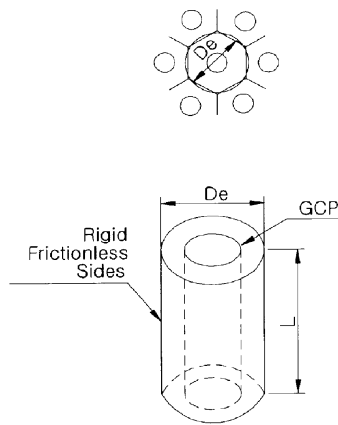


그림 2. 단일등가원주모형

쇄석말뚝과 점토지반으로 이루어진 복합지반의 압밀계산에서 침하에 대한 문제는 현장에서 시공결과 및 경험에 의해 어느 정도 정량적으로 파악되고 있으며, 무처리 지반에 비해 1/3~2/3 정도 감소되는 것으로 알려져 있는데(Barksdale과 bachus, 1983), 그 이유는 원지반의 개량효과와 복합지반으로서의 특성에 의한 것으로 볼 수 있다. 이러한 복합지반의 침하량은 점성토에 작용하는 연직응력에 의해 정해지고 계산된다.

### 2.1 평형방법

Aboshi 등(1979)과 Barksdale(1981) 등에 의해 제안된 평형

방법(equilibrium)은 응력분담비( $n$ )를 적용하여 복합지반의 침하량을 산정하였다.

고전적 일차원 압밀 이론에서 복합지반의 압밀 침하량은 다음 식(1)과 같다.

$$S_t = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log_{10} \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \mu_c \sigma}{\bar{\sigma}_0} \right) \quad (1)$$

쇄석말뚝으로 개량된 지반과 원지반과의 침하비를 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 침하 저감계수( $\beta$ )라고 한다.

$$\beta = \frac{S_t}{S} = \frac{\log_{10} \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \mu_c \sigma}{\bar{\sigma}_0} \right)}{\log_{10} \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \sigma}{\bar{\sigma}_0} \right)} \quad (2)$$

### 2.2 $\beta$ 방법(체적변형계수에 의한 방법)

복합지반의 침하특성은 침하 감소효과라고 볼 수 있다. 이것은 샌드 드레인에서는 시간경과에서  $n = d_e/d_w$ 가 결정되지만 복합지반에서는 점성토에 걸리는 응력에 의한 침하가 쇄석말뚝의 응력집중에 따라  $\mu_s \Delta p$  보다 작은 하중이 작용하는 장소에 있기 때문이다.

복합지반의 최종침하량을  $S_t$ , 무처리 지반의 경우의 최종침하량을  $S$ 로 하면 각각 다음 식으로 표시된다.

$$S_t = \varepsilon_z \cdot H = m_v \cdot \mu_c \cdot \Delta \sigma \cdot H \quad (3)$$

$$S = m_v \cdot \Delta \sigma \cdot H \quad (4)$$

복합지반의 침하량과 무처리지반의 침하량의 비를 침하저감계수  $\beta$ 라고 정의하면

$$\beta = \frac{S_t}{S} = \frac{m_v \mu_c \Delta \sigma H}{m_v \Delta \sigma H} = \mu_c \quad (5)$$

$$S_t = S \cdot \mu_c = (S \cdot \beta) \quad (6)$$

복합지반의 최종침하량  $S_t$ 는 식(5)에 표시한 바와 같이 침하저감계수  $\beta$ 는 전단강도 표시식의 응력감소계수  $\mu_c$ 와 같은 형태로 표현된다.  $\beta$ 는 저치환 개량에서 응력집중효과, 고치환 개량에서는 치환효과를 기대하여 다음과 같이 제안되었다.

$$\text{저치환개량의 경우}(a_s < 0.5) \beta = \mu_c = \frac{1}{1+(n-1) \cdot a_s} \quad (7)$$

$$\text{고치환개량의 경우}(a_s \geq 0.5) \beta = 1 - a_s \quad (8)$$

여기서,  $a_s =$  면적치환율( $a_s = A_s/A$ )

### 2.3 쌍곡선법

쌍곡선법(Hyperbolic method)은 침하의 평균속도가 시간에 대하여 쌍곡선적으로 변한다고 가정하여  $t \sim t/(S_t - S_0)$ 의 관계가 일정한 직선성을 가지는 성질을 이용한다. 이 방법은 다른 침하예측기법에 비해 그 적용방법이 비교적 간단하고 또한 그 결과는 실제와 비교적 잘 일치한다고 알려져 있다.

임의의 시점에서의 침하량과 시간이 무한대인 경우의 침하량은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = S_0 + t / (\alpha + \beta t) \quad (9)$$

$$S_\infty = S_0 + 1 / \beta \quad (10)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 원통형 압밀 시험기

쇄석말뚝의 압밀특성을 분석하기 위해 그림 3과 같은 원통형 셀 시험기를 제작하였다. 시험기는 직경 10cm, 높이 15cm로 횡방향 변형을 구속하기 위하여 0.5cm 두께의 아크릴로 제작하였으며 그리스를 이용하여 측면마찰의 영향을 줄였다.

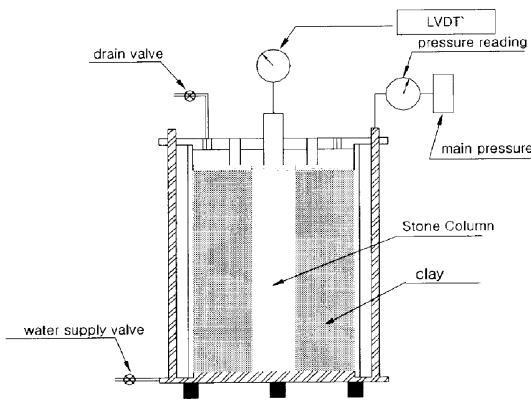


그림 3. 원통형 압밀시험장치

상부에는 일 방향 배수를 위해 배수밸브와 다공판이 설치되어 있으며 하부에는 물 공급을 위한 공급밸브가 설치되어 있다. 쇄석말뚝 설치를 위한 케이싱은 셀의 직경에 따른 치환율을 산정하여 강관(steel pipe)으로 제작하였고 케이싱 삽입과 인발에 따른 교란을 최소화하기 위하여 케이싱 주위에 그리스를 도포하였다. 또한 압밀하중은 삼축압축 시험기의 압축공기 조절기를

이용하여 연속적이고 균일한 하중을 유지할 수 있게 하였으며, 시간에 따른 침하량을 1/100mm까지 측정할 수 있는 LVDT를 상부에 설치하였다.

### 3.2 시험대상시료의 공학적 특성

본 실험에 사용된 시료는 서해안 당진 지역에서 채취한 실트질 점토로서 시료를 교란된 상태로 채취하여 실내에서 불순물을 제거한 후 재 성형하였다. 재성형 시료는 액성한계 이상의 고풍수비로 조성하여 포화도를 높일 수 있도록 하였다.

KSF 규정에 근거한 대상 시료의 물리적·역학적 성질은 다음 표 1, 2와 같다.

표 1. 대상시료의 공학적 특성

Classification of soil	CL-ML
Specific density $G_s$	2.65
Natural water contents $\omega$ (%)	35~38
Liquid Limit LL (%)	30~40
Plastic limit PL (%)	15~20
Plasticity Index (%)	15~20
#200 (%)	91
Total unit weight( $kN/m^3$ )	16.87

표 2. 쇄석재의 물리적 특성

Physical property	Quantity
Uniform coefficient	1.92
Coefficient of gradation	1.23
Maximum dry density( $kN/m^3$ )	16.4
Minimum dry density( $kN/m^3$ )	13.65
Angle of internal friction( $\phi$ )	44

### 3.3 실험 방법

본 실험은 연약점토 지반에 조성된 쇄석말뚝의 저치환율에서 침하특성 및 강도증가 효과 및 하중 배분을 규명하기 위해 0.2, 0.4, 0.5 $kg/cm^2$ 의 예비하중을 재하하여 예압밀을 실시하였으며 쇄석말뚝의 치환율을 0, 10, 20, 30%로 변화시키면서 한 하중 단계에서 1차 압밀 종료시까지 각각의 하중을 가압하여 단계에 따른 시간-침하 양상을 관찰하였다. 단계별 하중재하는 삼축압축시험기의 Air regulator를 이용하였으며 실제 지반의 배수재를 통한 압밀을 재현할 수 있도록 가압을 실시하였다. 또한, 중앙부의 쇄석말뚝 부위로 배수가 집중될 수 있도록 하부방향의 배수를 억제하고 상부방향 배수만을 허용하였다. 시험종료 후

복합지반의 전단강도 증가효과를 측정하기 위하여 배인시험을 실시하였다. 모형실험은 선단이 지지되도록 하여 관입과피나 말뚝의 좌굴을 최대한 억제하도록 하였다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

쇄석말뚝과 점토지반의 거동특성을 규명하기 위하여 치환율을 0, 10, 20, 30%로 변화시켜 1.0, 2.0, 2.5kg/cm<sup>2</sup>의 단계하중을 재하하고 시간-침하 양상과 최종 침하량 및 압밀도 90%에 도달하는 압밀 시간비를 측정하였다. 또한 시험 종료후 배인 시험을 실시하여 지반강도의 증가를 분석하였으며, 쌍곡선법을 이용하여 복합지반의 장기침하량 및 잔류 침하량을 치환율에 따라 비교 분석하였다.

##### 4.1 복합지반의 압밀 침하 특성

그림 4는 치환율 10, 20, 30%인 경우 각 하중단계에서의 시간-침하곡선을 나타내고 있다. 하중 1.0kg/cm<sup>2</sup> 재하시 가장 많은 침하가 발생되고 압밀 초기에는 쇄석말뚝으로 보강된 복합지반의 초기 침하속도가 무보강지반에 비해 빠른 경향을 나타내며, 이러한 경향은 하중단계가 증가함에 따라 쇄석을 통한 배수의 촉진으로 두드러지는 양상을 띄고 있는 것으로 관찰되었다. 침하량은 하중단계가 증가함에 따라 침하량이 감소하는 경향을 보이며 치환율이 증가함에 따라 두드러지게 감소하였다. 또한, 무보강 지반에 비해 현저히 짧은 시간에 압밀이 종료되는 양상을 관찰할 수 있었다.

그림 5, 6, 7은 시간에 따른 침하 양상을 정규화 시키기 위하여 각 하중 단계별 변형률을 분석하고 치환율과 하중 단계에서의 변형율의 증분을 해당 시간으로 나눈 변형률 속도의 관계를 보이고 있다.

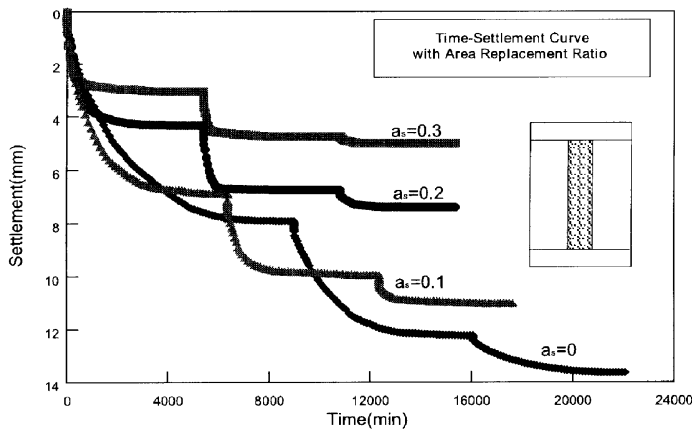


그림 4. 치환율에 따른 시간-침하곡선

하중단계 1.0kg/cm<sup>2</sup>의 경우 치환율에 따라 변형속도의 감소경향이 2~3배 이상의 차이를 보이고 있으며 원지반과는 상당한 차이를 나타내고 있다. 또한, 재하 초기의 변형은 치환율에 상관없이 거의 일정한 속도로 발생되고 있다. 따라서, 해석결과 20%와 30% 치환시에는 큰 차이를 보이고 있지는 않으나 치환율이 높아질수록 압밀 종료시점이 짧아지는 경향을 나타내고 있어 쇄석말뚝이 배수를 유도하여 압밀을 촉진시키고 있음을 확인할 수 있었다.

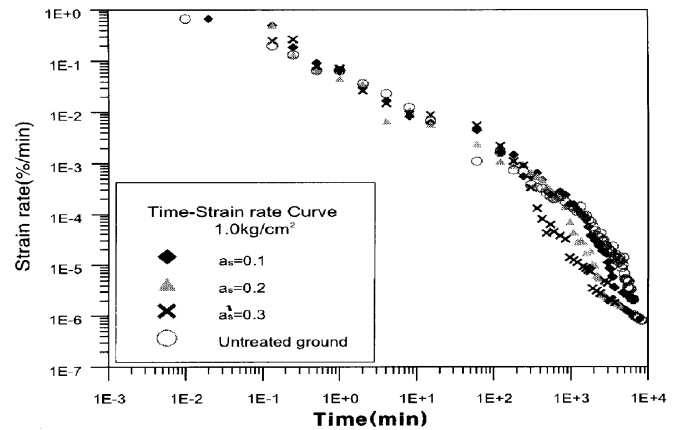


그림 5. 치환율에 따른 시간-침하속도곡선(1.0kg/cm<sup>2</sup>)

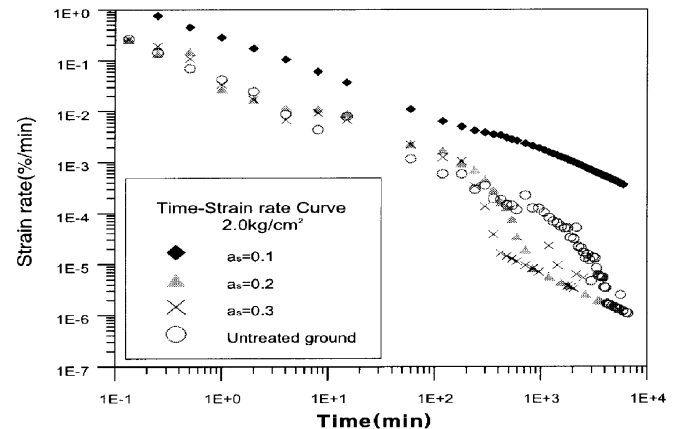


그림 6. 치환율에 따른 시간-침하속도곡선(2.0kg/cm<sup>2</sup>)

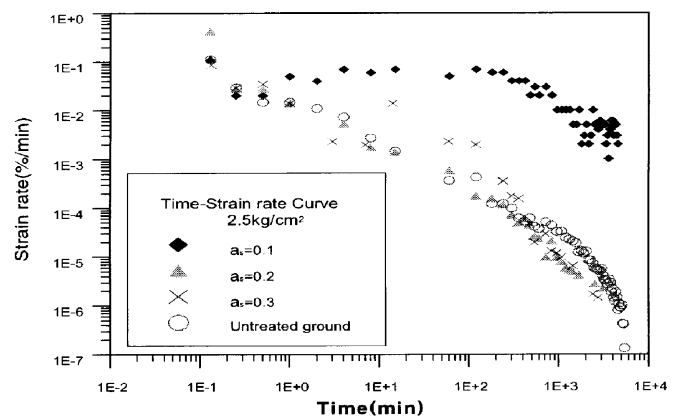


그림 7. 치환율에 따른 시간-침하속도곡선(2.5kg/cm<sup>2</sup>)

2.0kg/cm<sup>2</sup> 하중단계에서 20, 30% 치환시에는 1.0kg/cm<sup>2</sup>의 하중단계와 유사한 경향을 나타내고 있으며 원지반과도 상당한 변형률 속도의 감소 경향을 볼 수 있었다. 또한 초기 하중단계에 비해 감소율이 빠른 시간내에 도달되고 있다. 2.0kg/cm<sup>2</sup>과 2.5kg/cm<sup>2</sup>의 10% 치환시에 보이는 변형속도 곡선은 재하로 인한 말뚝의 변형이나 배수 효과의 감소에 기인한 것으로 판단된다.

각 하중단계에 대한 실험 결과 보강지반의 변형속도는 초기에는 하중단계에 관계없이 유사한 경향을 나타내며 일정 시점을 기준으로 감소율이 증가되는 경향을 보이고 있다.

## 4.2 쇄석말뚝의 침하 감소 효과

치환율에 따른 복합지반의 침하 감소효과는 다음과 같다.

표 3. 치환율과 압밀하중에 따른 압밀 침하량

Loads	Settlement(Reduction ratio %), mm			
	a <sub>s</sub> = 0	a <sub>s</sub> = 0.1	a <sub>s</sub> = 0.2	a <sub>s</sub> = 0.3
1.0kg/cm <sup>2</sup>	7.92	6.87(13)	4.33(45.32)	3.05(61.49)
2.0kg/cm <sup>2</sup>	4.32	3.07(28.9)	2.42(43.98)	1.7(60.74)
2.5kg/cm <sup>2</sup>	1.4	1.08(22)	0.65(53.5)	0.26(81.42)

실험결과 말뚝의 면적 치환율이 증가할수록 침하감소 효과가 크게 나타남을 알 수 있었으며 이러한 경향은 재하 초기 단계에서 두드러게 나타났다.

이러한 침하감소 효과는 원지반의 침하량과 쇄석말뚝으로 치환된 복합지반의 침하량의 비로 산정하는 침하저감계수 β로도 나타낼수 있으며 침하감소계수가 작을수록 침하감소 효과가 증가함을 나타낸다.

그림 8는 Bergado(1987)가 제안한 침하감소계수의 범위와 실험을 통해 산정된 값을 비교하고 있다.

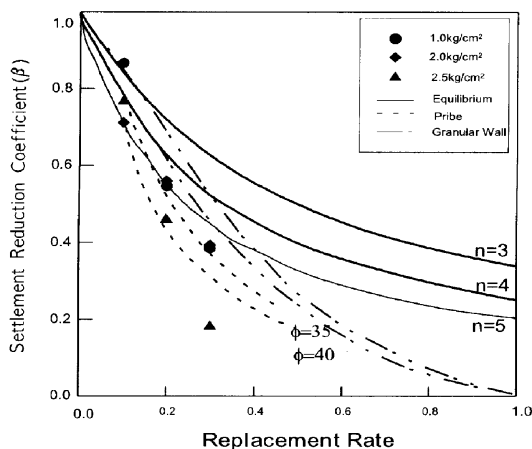


그림 8. 치환율에 따른 침하저감계수

표 4. 각 기법에 따른 침하감소계수의 비교

Methods	Settlement reduction coefficient(β)			Remark
	a <sub>s</sub>			
	0.1	0.2	0.3	
This study	0.08	0.55	0.37	Laboratory test
Priebe method	0.64	0.46	0.35	φ <sub>s</sub> =44°
Equilibrium method	0.63	0.55	0.49	using n
β method	0.77	0.625	0.53	using m <sub>v</sub>

다음 표 4는 침하저감계수를 기존의 일차원 압밀 이론을 근거로 제안된 방법과 비교한 값을 보이고 있으며, 전체적으로 비슷한 범위에서 분포하고 있으나 Priebe method와 Equilibrium method는 실험결과에 비하여 다소 과소 평가됨을 알 수 있다. 그림 8과 같이 실험을 통해 산정된 침하저감계수는 Bergado가 제시한 기존 제안치와 비교적 유사한 결과를 나타내고 있으며 복합지반의 침하저감 효과가 복합지반의 치환율 및 재하하중, 내부마찰각 등에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

## 4.3 복합지반의 압밀 시간

공극수압을 사용하여 산정한 압밀도와 침하량을 이용한 압밀도가 비교적 일치한다는 Terzaghi(1943)의 이론에 근거하여 최종 침하량과 현재의 침하량을 이용하여 압밀도 기준 90%에 도달하는 압밀도달 시간을 산정하였다.

복합지반과 원지반과의 압밀 소요시간을 비교하기 위하여 원지반의 압밀도 90%에 해당하는 시간을 1로 하여 쇄석말뚝의 압밀도 90%에 도달하는 시간을 압밀 하중 및 치환율 변화에 따른 원지반에 대한 쇄석말뚝의 압밀 시간비를 그림 9에 나타내었다.

전체적으로 복합지반의 압밀도 90%에 도달하는 시간이 무보강 지반에 비해 모든 압밀 하중단계 및 치환율에서 짧게 나타나

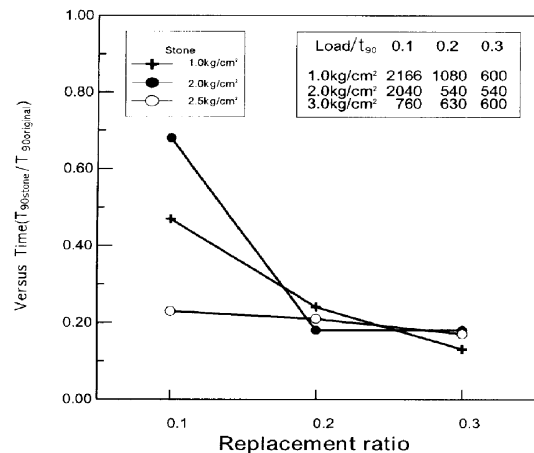


그림 9. 치환율에 따른 압밀도 도달시간

고 있으며 치환율의 증가에 따른 압밀 시간의 단축효과가 커짐을 알 수 있었다. 또한, 이러한 경향은 재하 초기단계에서 두드러지는 것으로 나타났다.

#### 4.4 복합지반의 침하 예측

침하 자료를 이용한 최종 침하량의 추정 기법은 Asaoka 방법, Hyperbolic 방법, Hoshino 방법 등이 있다. 본 연구에서는 쇄석말뚝으로 보강된 복합지반의 침하에 Hyperbolic 방법을 적용하여 장

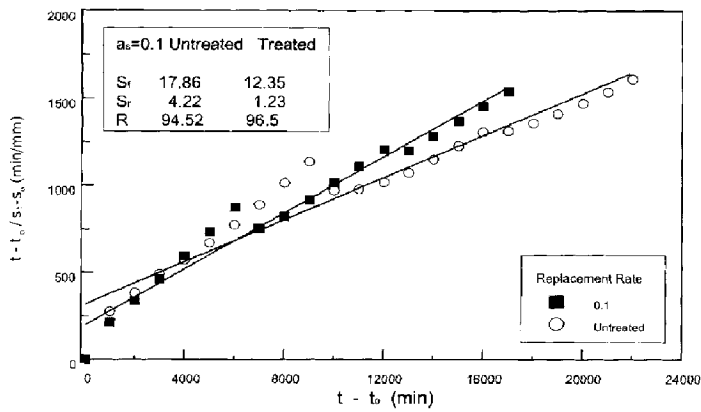


그림 10. 실험결과를 이용한 선형회귀분석( $a_s=0.1$ )

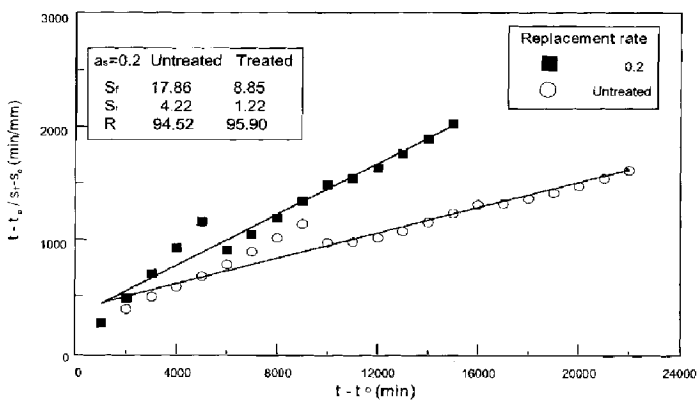


그림 11. 실험결과를 이용한 선형회귀분석( $a_s=0.2$ )

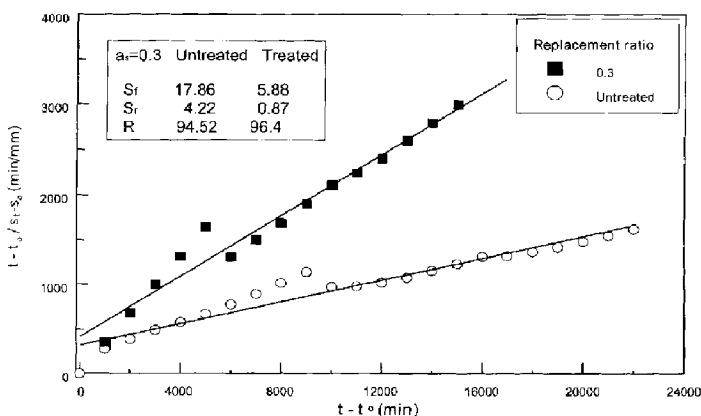


그림 12. 실험결과를 이용한 선형회귀분석( $a_s=0.3$ )

기 침하량을 예측하였으며 이에 따른 잔류침하량을 산정하였다.

해석에 필요한 각 파라미터는 선형 회귀분석을 이용하였으며 침하해석은 압밀 완료 후 시간을 기준으로 동일하게 적용하여 치환율 변화에 따른 침하량을 산정·비교하였다.

쇄석말뚝으로 치환된 복합지반의 최종 침하량을 예측하기 위하여 압밀 하중의 재하가 종료된 시간을 기준으로 해석을 수행하였으며 치환율의 변화에 따라 최종 침하량을 비교하였다.  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 결정하기 위한 모형실험의 분석 결과는 그림 10~12와 같은 쌍곡선 방법을 이용한 침하 해석 결과가 치환율 변화에 따라 표 5에 보여진다.

복합지반에 대한 해석결과 치환율이 증가함에 따라 실내실험 결과와 같이 최종 침하량이 감소하여 치환율 증가에 의한 지반의 침하억제 효과를 확인 할 수 있었다. 또한, 실험을 통한 최종 침하량과 비교하여 적은 범위내에서 예측침하량이 나타나므로 쇄석말뚝 보강지반의 장기침하량 예측에 있어 쌍곡선법의 적용 가능성을 확인할 수 있었으나 향후 치환율의 변화에 따른 침하억제 효과와 현장시험시공을 통한 다양한 침하예측 기법의 검증이 필요할 것이다.

표 5. 쌍곡선법을 이용한 쇄석보강지반의 침하량 산정 결과

$a_s$ (%)	$\alpha$	$\beta$	St(mm)	Si(mm)	Sr(mm)	R(%)
0	381.61	0.056	13.64	17.86	4.22	94.52
10	197.87	0.081	11.02	12.35	1.23	96.50
20	318.42	0.116	7.4	8.85	1.20	95.90
30	413.263	0.17	5.01	5.88	0.87	96.40

#### 4.5 쇄석말뚝의 강도 증가 효과

쇄석말뚝은 복합지반으로서의 효과에 의한 침하감소 및 배수층으로서의 역할로 압밀을 촉진시켜 장래 설계하중에 대한 잔류침하를 줄이며 아울러 지반의 강도를 증가시켜 구조물의 안정성을 향상시키는 효과가 있는 것으로 평가되어 왔다. 본 연구에서는 쇄석말뚝에 의한 지반의 강도증가 효과를 확인하기 위하여 배인 시험을 이용하여 원지반 및 복합지반의 전단강도를 실험 전후 깊이에 따라 측정하여 지반강도 증가효과를 확인하였다.

대상지반의 강도는 압밀 후 배수에 의해 약 80%의 강도증가를 보였으며 보강 후 높이(0.8H, 0.4H, 0.1H)에 따라 치환율이 10%의 경우 27~38%, 치환율이 20%의 경우 67~74%의 강도증진이 보여진다. 쇄석말뚝으로 보강된 복합지반의 강도 증가 현상은 쇄석에 의한 압밀 배수 촉진과 재하시 방사방향으로의 응력 전달에 기인된 것으로 판단된다.

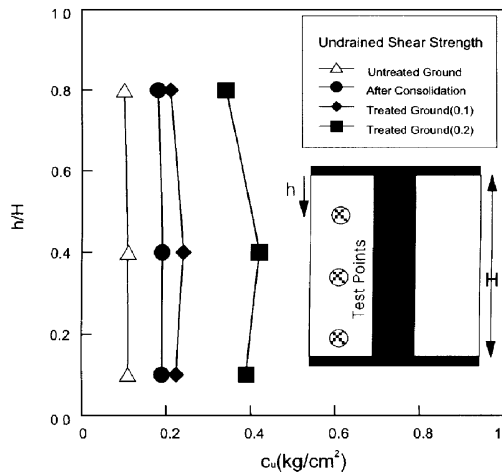


그림 13. 베인전단시험결과

## 5. 결론

(1) 전체 최종 침하량은 무보강지반에 비하여 쇄석말뚝으로 보강된 복합지반의 치환율에 따라 10%, 20%, 30%일 때 19.20%, 45.75%, 63.27%의 침하 감소가 나타나 치환율의 증가에 따른 침하 감소 효과가 큰 것을 확인할 수 있었으며, 이러한

경향은 재하 초기 단계에서 두드러게 나타났다. 또한, 침하저감계수는 치환율에 따라 0.80, 0.55, 0.37의 값을 보여 기존 제안 값과 유사한 경향을 보여주고 있다.

(2) 전체적으로 복합지반의  $T_{90}$ 은 무보강 지반에 비해 모든 압밀 하중단계 및 치환율에서 짧게 나타나고 있으며 치환율의 증가에 따른 압밀 시간의 단축효과가 커짐을 알 수 있었다. 또한 이러한 경향은 재하 초기단계에서 두드러지는 것으로 나타났다.

(3) 이론식을 통한 장기 침하량 및 잔류 침하량을 예측한 결과 원지반에 비하여 복합지반에서 최종 침하량은 치환율 증가에 따라 30.85% 50.45% 67.08% 감소되었고, 쇄석의 경우 잔류 침하량은 쇄석은 70.85%, 71.56%, 79.38%의 감소를 나타내어 쇄석말뚝의 침하억제 효과를 검증하였으며 실험치와의 비교를 통하여 쇄석말뚝 보강지반에 대한 침하 예측이 가능함을 확인하였다.

(4) 복합지반의 강도는 치환율에 따라 27~38%, 67~74%정도로 증가하였으며 이러한 현상은 쇄석에 의한 압밀 배수 촉진과 재하시 방사방향으로의 응력 전달에 기인된 것으로 판단된다. ☺

## 참 고 문 헌

1. 김병일, 박용원, 윤길림, 조성환(2000), 모래다짐말뚝으로 개량된 연약지반의 유한요소 해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권, 제4-C호, pp.357~366.
2. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제14권, 제5호, pp. 143~161.
3. 천병식, 김백영, 고용일, 여유현, 박경원(1999), 실내모형시험을 통한 Gravel Drain의 배수효과에 관한 연구, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집 1999, 한국지반공학회, pp.87~94.
4. 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.
5. Barksdale, R.D. and Bachus, R.C.(1983), Design and Construction of Stone Columns Vol I, Report No.FHWA/RD-83/026, FHWA, Washington D.C, pp.141~151, 1983.
6. Bergardo, D.T. et al.(1996), Soft Ground Improvement in lowland and other environments, ASCE Press, New York, pp.186~230.
7. Pande, G.N., Lee, J.S. and Amaniampong, G.(1994), A Numerical Model for Stone Column reinforced Foundations, Computer Method and Advances in Geomechanics, Vol I, pp.245~256.
8. Shahu, J.T., Madhav, M.R. and Hayashi, S.(2000), Analysis of Soft Ground-Granular Pile-Granular Mat System, Computers and Geotechnics 27, pp.45~62.
9. Siew-ann tan.(1995), Validation of Hyperbolic method for Settlement in Clays with Vertical Drains, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.35, No.1, pp.101~113.