

# Granular Pile에 의해 개량된 연약지반의 거동특성

## Behavior characteristics of Soft Ground Improved by Granular Pile

천병식\*  
Chun, Byung-Sik

### ABSTRACT

As construction cases on soft ground are increasing, the necessity of ground improvement is also increasing. Granular pile is one of the methods for soft clay and for loose sandy soil. In our country, SCP(Sand Compaction Pile) method using sand material has been mainly used to improve soft ground, but Granular pile with crushed-stone was not used much. However, alternative material such that crushed-stone is needed to substitute for sand due to the environmental and economical problems.

In this study, staged load test and consolidation test were performed in the laboratory to observe the behavior of soft ground improved by Granular pile. In order to evaluate the characteristics such as bearing capacity, drainage, and settlement, sand and crushed-stone were applied as each pile material. The test results show that crushed-stone has higher bearing capacity and less settlement than those of sand under similar pore water pressure condition. Therefore, crushed-stone is determined to be appropriate as substitute for sand.

**Keyword :** Granular pile, Soft ground, Ground improvement, Alternative materials

### 요 지

연약지반에 구조물을 시공하는 경우가 빈번해짐에 따라 연약지반 개량의 필요성이 증대하고 있다. Granular pile 공법은 연약한 점성토 지반이나 느슨한 사질토 지반의 개량에 사용되는 연약지반처리공법이다. 국내에서는 모래를 이용한 SCP공법은 종종 사용해 왔지만 쇄석을 이용한 Granular pile은 외국에 비해 그 사용실적이 미비한 실정이다. 그러나 모래자원의 고갈에 따른 환경적, 경제적인 문제때문에 모래 대신 이용할 수 있는 대체재의 필요성이 절실해지고 있다.

본 연구에서는 Granular pile 공법에 의해 개량된 연약한 점성토 지반의 거동 특성을 파악하기 위하여 모형토조를 이용한 하중재하 및 압밀시험을 실시하였다. 또한, Pile 재료로서 모래뿐만 아니라 쇄석을 이용한 실내모형 시험으로 각각의 재료에 따른 지지력 특성 및 침하 특성, 배수 특성 등의 공학적 특성을 비교 평가하여 모래의 대체재로서 쇄석의 활용가능성을 검토하였다. 시험결과, 쇄석은 모래 재료에 비해 지지력증대와 침하저감효과가 크고, 유사한 간극수압특성을 보여 모래의 대체재료로서 쇄석의 활용이 가능하다고 판단된다.

**주요어 :** Granular pile, 연약지반, 지반개량, 대체재

\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사

## 1. 서론

삼면이 바다로 둘러싸이고 국토면적이 좁은 우리나라는 해안 및 내륙의 연약지반의 활용을 통한 효율적인 국토이용이 절실한 실정이다. 그러나 국내 해안지역의 연약지반은 유동성이 큰 포화 점성토층이 깊은 심도로 분포하고 있고, 대부분이 압밀진행성 점토로서 상부구조물 등의 상재하중 작용시 압밀침하, 전단변형 등이 발생하므로 안정성 확보를 위한 연약지반처리는 필수적이라고 할 수 있다. Granular pile 공법은 이러한 연약지반을 개량하는 공법으로서 연약한 점성토 지반이나 느슨한 사질토 지반에 시공시, 원지반과 Granular pile이 함께 거동하는 복합지반을 형성하여 복합강도를 가지게 되므로 지지력증대, 침하저감, 배수효과를 기대할 수 있다.

국내에서는 모래를 이용한 SCP(Sand Compaction Pile)공법은 광양제철단지 조성(1983년)이후로 많이 사용해 왔지만, 쇄석을 이용한 Granular pile은 외국에 비해 그 사용실적이 미비한 실정이다. 그러나, 모래 재료의 고갈에 따른 환경적, 경제적인 문제 때문에 모래대신 이용할 수 있는 대체재가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 쇄석과 모래로 Pile을 형성하고 모형토조를 이용한 하중재하시험 및 압밀시험을 실시하여 Crushed-stone pile과 Sand pile에 의해 개량된 연약한 점성토 지반의 지지력 특성 및 압밀침하 특성, 배수 특성 등의 복합지반효과를 알아보고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

Granular pile 공법은 연약지반에 원통형으로 모래, 쇄석 등의 Granular 재료를 다지면서 압입하여 비교적 지름이 큰 Granular pile을 지중에 형성시켜 지반을 개량하는 공법으로서, 모래지반인 경우 밀도증대와 액상화 방지, 수평저항력 등을 증가시키고 점토지반에서는 원지반과 다져진 Granular pile로 이루어진 복합지반을 형성함으로써 지반의 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위억제, 압밀침하저감 등의 효과를 목적으로 한다. Granular pile 재료로서 모래와 쇄석을 이용한 경우의 차이점은 개량재인 모래가 쇄석으로 대체된 것 외에는 공법 적용 및 기능상의 차이가 거의 없다고 할 수 있

다. 단지 Pile 자체가 쇄석으로 형성됨으로서 어느정도 지지력 증대와 침하량 감소가 예상되는 것이 그 차이라고 볼 수 있다.

### 2.1 지지력 이론

Granular pile의 극한지지력 평가 제안식은 점성토 지반의 경우에만 국한하여 제안되었으며, 점성토 지반에 비해 Granular 재료는 강성이 크기 때문에 Pile 설치 주변지반의 측면지지에 따라 파괴거동이 달라진다. Hansbo(1994)는 보통 점성토지반의 상층부분은 일반적으로 높은 강도를 갖고 있기 때문에 지반의 전단강도가 최소가 되는 지점에서 팽창과파괴가 발생한다고 보았다.

Hughes와 Withers(1974)는 Granular pile의 팽창과파괴를 프레스미터 시험기의 팽창거동과 유사한 것으로 가정하고 다음 식(1)을 제안하였다.

$$q_{ult} = \left( \sigma_{ro} + \left[ 1 + \ln \frac{E_c}{2c(1+\nu)} \right] \right) \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right) \quad (1)$$

여기서,  $q_{ult}$ 는 Granular pile의 극한지지력,  $\sigma_{ro}$ 는 초기 유효방사응력이며  $E_c$ 는 주변지반의 탄성계수,  $\phi_s$ 는 Granular pile의 내부마찰각,  $\nu$ 는 포아송비를 나타낸다.

Hansbo(1994)는 소성이론에 근거하여 실린더형 팽창의 경우에 파괴시 방사응력을  $\sigma_{ro} + 5c_u$ 로 가정하고 Mohr-Coulomb 파괴규준에 적용하여 다음 식(2)를 제안하였다.

$$q_{ult} = (\sigma_{ro} + 5c_u) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \quad (2)$$

여기서,  $q_{ult}$ 는 Granular pile의 극한지지력,  $\phi_s$ 는 Granular pile의 내부마찰각,  $\sigma_{ro}$ 는 수평상재압,  $c_u$ 는 주변지반의 비배수전단강도이다.

Vesic(1972)은 실린더형 공동팽창이론을 마찰과 점착력이 있는 흙에 적용하여 다음 식(3)을 제안하였다.

$$q_{ult} = (F'_c \cdot c + F'_q \cdot q) \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right) \quad (3)$$

여기서,  $q_{ult}$ 는 Granular pile의 극한지지력,  $\phi_s$ 는 Granular pile의 내부마찰각,  $q$ 는 bulge의 평균깊이에서의 응력이며 비배수조건이고 체적변형을 무시할 때  $F'_c = \ln I_r + 1$ ,  $F'_q = 1$ 이 되며,  $I_r$ 은 강성지수로서 전단탄성계수(G)와 흙의 초기전단강도( $\tau = c + \sigma \tan \phi$ )의 비로 표현된다.

Brauns(1978)는 Granular pile에 대한 3차원 수동토압 이론을 적용하여 다음 식(4)와 식(5)를 제안하였다.

$$\frac{\sigma_s}{c_u} = \left( \frac{q}{c_u} + \frac{2}{\sin 2\delta} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\tan \delta_s}{\tan \delta} \right) \tan^2 \delta_s \quad (4)$$

$$p_a = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{F_s} \quad (5)$$

여기서,  $p_a$ 는 Granular pile의 설계지지력,  $\delta$ ,  $\delta_s$ 는 주변지반과 Granular pile의 전단파괴면각,  $\sigma_s$ 는 초기 극한응력,  $q$ 는 상재하중,  $A_s$ 는 Granular pile의 단면적,  $\phi_s$ 는 Granular pile 재료의 내부마찰각,  $c_u$ 는 주변지반의 비배수전단강도,  $F_s$ 는 안전율(보통  $F_s = 2$ )이다.

### 2.3 장기침하 예측이론

Miyakawa(1961)는 그림 1과 같이 실측곡선에서 장래 예상되는 예측 침하곡선의 형태가 쌍곡선의 형태를 취한다는 가정하에 장기침하량을 추정하는 방법을 제시하였다.

$$\frac{t}{(S_t - S_o)} = a + \beta t \quad (6)$$

여기서,  $S_t$ 은 임의의 시간  $t$ 에서의 침하량이며  $S_o$ 는 초기침하량,  $a$ 는 종축절편,  $\beta$ 는 기울기이다.

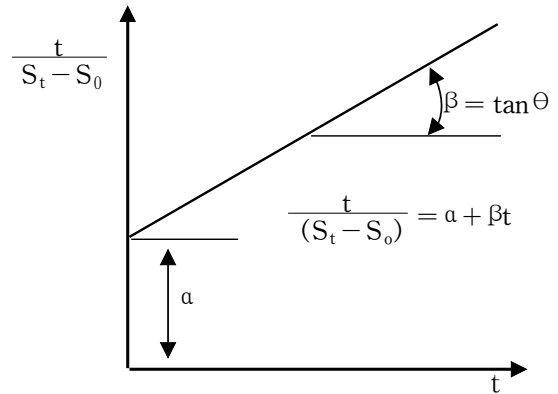


그림 1. Hyperbolic method

성토종료 후  $t$ 시간동안의 실측침하량을 기본으로 하여 식(7)로부터 Y축에  $t / (S_t - S_o)$ 를 취하고, X축에  $t$ 를 취하여  $t - t / (S_t - S_o)$ 의 관계를 도시한 직선에  $a$ 와  $\beta$ 값을 결정한다. 또한 최종침하량( $S_f$ )은  $t \rightarrow \infty$ 로 가정하여 식(7)로부터 구할 수 있다.

$$S_f = S_o + \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

여기서,  $S_f$ 는 최종 침하량이며  $S_o$ 는 초기침하량,  $\beta$ 는 기울기이다.

이 방법을 적용하여 추정된 침하량은 초기에는 실측치에 비하여 작고 후반부의 직선부분에서는 일치하는 경향이 있으므로 압밀도가 약 50%정도 도달해야만 어느 정도 근사치에 접근할 수 있는 것으로 알려져 있다.

## 3. 시험방법

### 3.1 대상시료의 특성

본 연구에서는 연약지반에서 Granular pile의 특성을 비교·평가하기 위하여 남해안 김해지역의 실트질 점토를 이용하여 모형지반을 형성하였다. 시험 전 시험대상토의 원지반 특성을 파악하기 위하여 비중, 체분석, 비중계, 액·소성, 삼축압축시험을 실시한 결과 우리나라 해성점성토에서 많이 볼 수 있는 CH(USCS)이며, 비중

은 2.7, 액성한계는 82.87%, 소성한계는 31.03%였다.

Pile을 형성하기 위한 채움재로서 쇄석은 25mm이하의 인공쇄석골재(Crushed-stone)를 이용하고 모래는 일반모래를 이용하였으며 채움재의 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 체분석시험, 다짐시험, 대형직접전단시험, 삼축압축시험을 실시한 결과 쇄석의 비중은 2.67 내부마찰각은 45.°, GP(USCS)이고, 모래의 비중은 2.62, 내부마찰각은 34.7.°, SP(USCS)로 파악되었다.

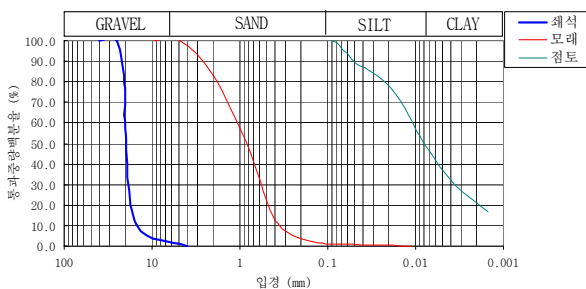


그림 2. 점토와 Granular 재료의 입도분포곡선

### 3.2 모형지반 제작

모형지반은 모형토조를 이용하여 설치하였으며, 그림 3의 모형토조 바닥에 8개의 직경 3mm 배수구를 만들어 시험하였다. 내부의 벽면은 평면변형을 조건을 위하여 Grease를 도포 후 비닐을 씌워 성형하였고 모형지반 제작은 하부 Sand mat를 포설한 후에 점성토 지반을 형성하였으며 다시 상부 Sand mat를 포설하였다. 모형지반은 물성치가 파악된 남해안 김해 지역의 실트질 점토를 이용하여 원지반 함수비인 70%~80%를 맞추어 토조에 넣었으며, 시험에 사용된 쇄석은 불순물의 제거를 위해 충분히 세척한 후 노건조하여 사용하고, 모래는 공기 건조하여 사용하였다. 시험 원지반 상·하부의 수평배수층(Sand mat층)은 그림 2의 입도분포를 가진 모래를 이용하여 50mm의 두께로 포설하였다.

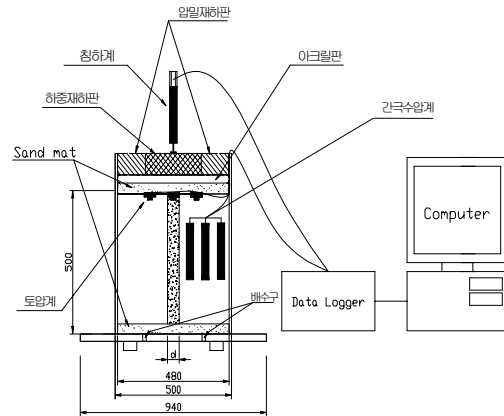


그림 3. 모형토조

### 3.3 Granular Pile 설치 방법

Granular pile의 설치에는 미리 PVC관을 설치하고 제작한 모형지반을 하루동안 자중압밀시킨 후, 공벽의 붕괴를 방지하기 위해 삽입된 PVC관을 일정간격으로 인발하며 Granular 재료를 다져 넣었으며, 인발시의 교란을 최소화 하기 위해 PVC관을 Grease로 도포하였다. PVC관의 직경은 각각 60mm, 75mm, 110mm로 하였으며, Pile 설치시 미리 계산된 양에 못 미치거나 타설이 불량한 경우에는 모형지반을 다시 제작하여 Pile을 재 설치하였으며 다짐시 점성토의 특성상 스펀지 현상이 발생하므로 최대한 공극이 발생하지 않도록 주의하여 다짐을 하였다. 동일한 조건에서 Crushed-stone pile은 쇄석의 입자크기가 크고 입자간의 마찰력이 크기 때문에 Sand pile 설치시보다 작업난이도가 매우 어려워 Pile 설치시 세심한 주의가 요구되었으며 Pile 설치시 일반적으로 발생하는 Smear zone의 영향은 Pile 설치시 교란된 영역이 Granular 재료에 의해 채워지면서 다져지므로 큰 영향을 미치지 못한다는 Barksdale & Bachus(1983)의 연구결과에 따라 고려하지 않았다.

### 3.4 하중재하시험

Crushed-stone pile과 Sand pile이 복합지반의 지지력 특성에 어떠한 영향을 주는가를 파악하기 위하여 Crushed-stone pile 설치지반과 Sand pile 설치지반 그

험시리고 원지반에 대하여 하중재하시험을 실시하였다. Crushed-stone pile과 Sand pile의 특성을 비교해보기 위하여 Unit cell이론(Balaam et al., 1977, Van Impe & Madhav, 1992)에 근거하여 점성토와 Pile의 침하를 동일하다고 가정하고 강성재하 조건을 적용하였으며, 재하관은 지름 150mm, 두께 25mm로 변형에 충분히 견딜 수 있는 강철관을 이용하여 단계별로 약 2.8kPa의 하중을 30분씩 총 9단계로 재하하였다. 또한, 치환율( $a_s$ )에 따른 변화를 관찰하기 위하여 Pile의 지름을 60mm, 75mm, 110mm( $a_s = 16, 25, 54\%$ )로 바꾸어 시험하였다.

### 3.5 압밀시험

Crushed-stone pile과 Sand pile이 복합지반의 압밀침하특성, 배수특성에 어떠한 영향을 주는가를 파악하기 위하여 Crushed-stone pile 설치지반과 Sand pile 설치지반 그리고 원지반에 대하여 압밀시험을 실시하였다. Crushed-stone pile과 Sand pile의 특성을 비교해보기 위하여 Unit cell이론에 근거하여 점성토와 Pile의 침하를 동일하다고 보고 강성재하 조건을 적용하였으며, 상부 Sand mat 위로 균등한 하중재하를 위하여 Grease를 도포한 지름 479mm, 두께 10mm의 아크릴판을 설치하고, 그 위에 변위에 충분히 견딜 수 있는 지름 460mm, 두께 25mm의 강철판과 지름 765mm, 두께 25mm의 강철판 그리고 10kg의 추 24개를 이용하여 압밀시험을 하였다. Pile의 지름은 110mm로 하여 단계별 성토에 따른 시간-침하량 관계를 분석하기 위하여 10kPa의 하중을 압밀재하한후 다시 10kPa을 추가하여 20kPa의 두 단계로 압밀재하 하였으며 재하시간은 한 단계에 4320분씩, 두 단계로 총 8640분 동안 재하하였다.

### 3.6 계측방법

하중재하시험시 모형지반 상부에 LVDT 변위계를 설치하였으며, 토압계를 Pile 상부에 1개소, 점토지반 상부에 2개소 설치하였다. 압밀시험시에도 모형지반 상부에 LVDT 변위계를 설치하였으며 Pile 상부에 1개소, 점토지반 상부에 2개소의 토압계를 설치하고 Pile 중심

에서 1.0D, 1.5D, 2.0D(D : Pile직경) 간격으로 진동현식 간극수압계를 설치하였으나 하중재하시험과 압밀시 토압계를 이용해 구한 응력분담비(m)는 Data의 분산이 심하여 결정할 수 없어 분석에서 제외하였다. 이것은 단계별로 재하한 하중이 균등하게 Pile과 점토지반에 분포되지 않았기 때문에 측정 토압이 정확히 측정되지 못하였다고 판단된다.

## 4. 시험결과

### 4.1 하중재하시험 결과

본 시험에서는 재하초기의 하중-변위 관계가 명확치 않을 경우에 재하 중반부의 직선구간이 시작되는 점의 하중을 항복하중으로 결정하는 방법인 S-logP법(沈, 1983)을 이용하여 지지력을 계산하였다.

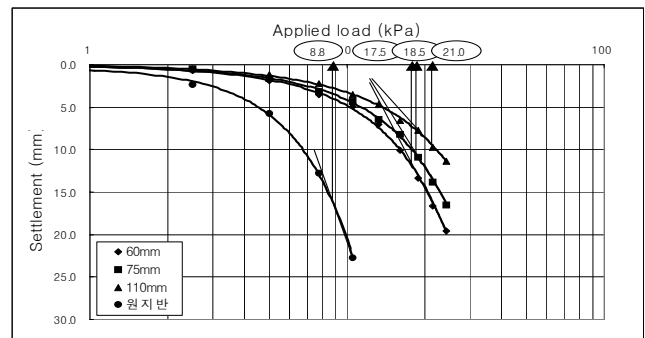


그림 4. 치환율에 따른 Crushed-stone pile의 하중-침하곡선 (S-logP법)

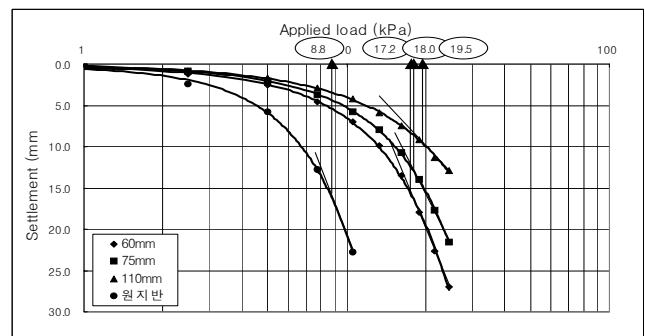


그림 5. 치환율에 따른 Sand pile의 하중-침하곡선 (S-logP법)

표 1. 치환율에 따른 Granular pile의 극한지지력의 변화

	Pile 종류	치환율 (%)	Pile 직경 (mm)	침하량 (mm)	$Q_y$ (kPa)
S-logP	Crushed-stone	16	60 mm	11.6	17.5
		25	75 mm	10.5	18.5
		54	110 mm	9.3	21.0
	Sand	16	60 mm	15.3	17.2
		25	75 mm	12.5	18.0
		54	110 mm	9.4	19.5
	원지반		15.8	8.8	

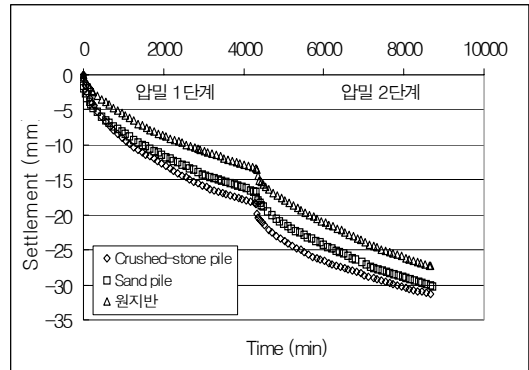
S-logP법에 의해 지지력을 구한 결과, 표 1에서와 같이 치환율이 16, 25, 54%로 높아짐에 따라 Crushed-stone pile은 원지반에 비해 항복하중( $q_y$ )이 99, 110, 139% 증가하였으며, Sand pile은 95, 104, 122% 증가하였다. 이것은 강성이 큰 Pile 설치로 인한 원지반과 Pile의 복합적인 거동에 의해 지지력 특성이 개선된 것으로 판단되며 Sand pile에 비해 Crushed-stone pile의 지지력이 다소 높게 나왔다.

#### 4.2 압밀시험 결과

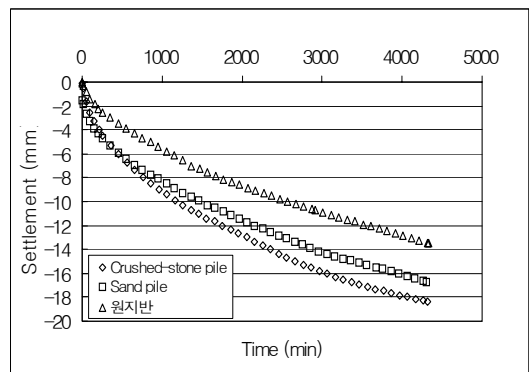
그림 6은 압밀 단계에 따른 시간-침하 특성을 분석하기 위하여 압밀 1단계와 2단계로 구분한 시간-침하 곡선이다. 압밀 1단계에서는 Crushed-stone pile의 침하가 Sand pile에 비해 10% 크게 발생하고 원지반에 비해 36% 크게 발생하였지만, 압밀 2단계에서는 Crushed-stone pile의 침하가 Sand pile에 비해 4% 작게 발생하고 원지반에 비해 7% 작게 발생하였다. 압밀 1단계에서는, 재하로 인한 응력의 증가로 인해 Crushed-stone pile의 채움재인 쇄석 입자의 느슨한 구조가 붕괴되면서 Sand pile과 원지반에 비해 침하가 많이 발생한 것으로 보이며, 압밀 2단계에서는 재배열된 쇄석 재료의 강성에 인한 침하저감효과가 Sand pile과 원지반에 비해 커지는 것으로 판단된다.

표 2. Granular pile의 시간-침하량 결과

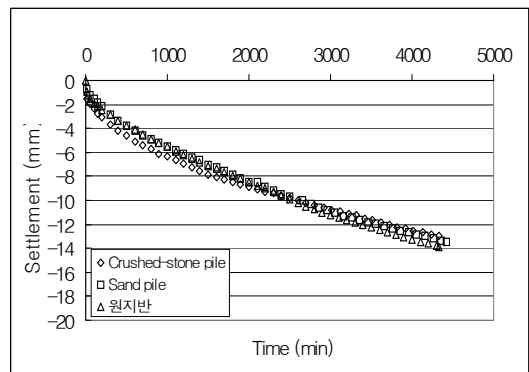
	1단계 침하량(mm)	2단계 침하량(mm)	전체 침하량(mm)
Crushed-stone pile	18.39	12.96	31.35
Sand pile	16.74	13.44	30.18
원지반	13.48	13.86	27.34



(a) 압밀 1,2 단계 시간-침하곡선



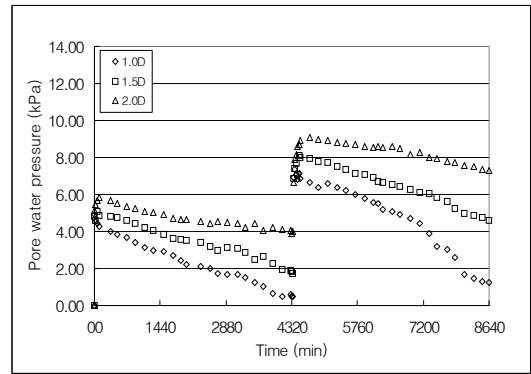
b) 압밀 1단계 시간-침하곡선



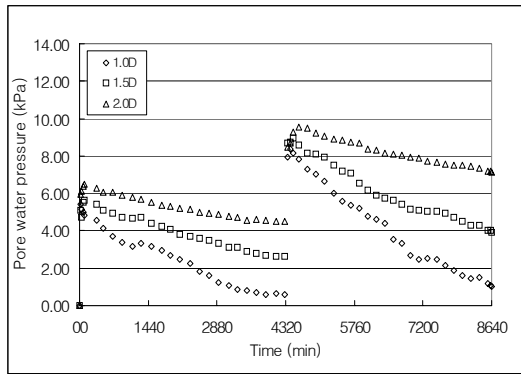
(c) 압밀 2단계 시간-침하곡선

그림 6. 압밀 1, 2단계 시간-침하곡선

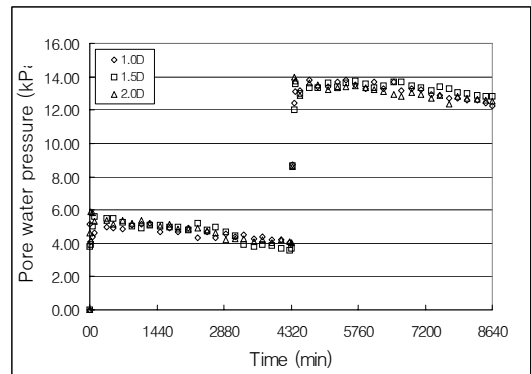
그림 7과 같이 1, 2단계로 구분한 Crushed-stone pile 과 Sand pile의 과잉간극수압은 1, 2단계 모두 하중재하 초기에 최대값에 도달한 후 점차 소산되기 시작하였으며, Pile에서 거리가 가까울수록 소산속도가 빠르고 최대과잉간극수압이 작게 나타났다. Crushed-stone pile은 Sand pile과 비교하여 시간 경과에 따른 과잉간극수압 소산정도가 크거나 유사하게 나타나고 있는 것으로 분석되며, Pile이 설치되지 않은 원지반은 1, 2단계 모두 거리별에 상관없이 과잉간극수압의 소산속도가 느리게 나타났다.



(b) Sand pile 설치지반 간극수압 변화



(a) Crushed-stone pile 설치지반 간극수압 변화



(c) 원지반 간극수압 변화

그림 7. Granular pile별 간극수압

표 3. Granular pile의 간극수압 측정결과

		1단계 압밀시험		2단계 압밀시험	
		최대과잉간극수압 (kPa)	최소과잉간극수압 (kPa)	최대과잉간극수압 (kPa)	최소과잉간극수압 (kPa)
Crushed-stone pile	1.0 D	5.42(10)	<b>0.58</b>	8.39(4421)	<b>1.01</b>
	1.5 D	5.61(60)	2.62	8.96(4481)	3.93
	2.0 D	<b>6.48</b> (100)	4.49	<b>9.57</b> (4601)	7.14
Sand pile	1.0 D	4.92(10)	<b>0.51</b>	7.38(4386)	<b>1.23</b>
	1.5 D	5.10(60)	1.75	8.09(4476)	4.59
	2.0 D	<b>5.82</b> (100)	3.98	<b>9.05</b> (4716)	7.29
원지반	1.0 D	5.21(1296)	3.91	13.81(4716)	<b>12.22</b>
	1.5 D	5.61(100)	<b>3.72</b>	13.77(5706)	12.82
	2.0 D	<b>5.89</b> (30)	4.05	<b>13.99</b> (4386)	12.51

\* ( )는 최대 과잉간극수압에 이르는 시간(min)

## 5. 결과분석 및 고찰

### 5.1 지지력 특성 비교

본 시험결과와 기존의 제안식들을 비교하기 위하여 비배수 조건으로 가정하고 점토지반의 탄성계수값은 Das가 제안한 값을 이용하여  $E_s = 150C_u$ , 포아송비( $\nu$ )는 0.5, 정지토압계수( $K_0$ )는 Brooker & Ireland(1965)가 제안한 재성형된 공시체에서 얻은 시험값인  $K_0 = 0.95 - \sin \phi'$ 를 이용하였다. 또한, 원지반의 비배수 전단강도는 Granular

Pile 시공 전 모형지반의 평균 비배수 강도인 8kPa로 결정하였으며, 시험종료 후 모형지반을 조심스럽게 굴착하면서 Pile의 변화양상을 육안 관찰하여 최대 팽창과괴가 발생하는 깊이를 0.1m로 하였다.

실험조건을 고려하여 Vesic, Hughes, Hansbo, Brauns의 제안식에서 극한지지력값을 구하였으며 계산한 극한지지력값과 시험결과의 항복하중을 비교하기 위하여 각각 3과 2의 안전율을 적용해 허용지지력 값으로 비교하여 보았다.

표 4. 기존 제안식과 측정지지력 비교결과

	계산 지지력 (kPa)								S-logP 측정 지지력 (kPa)					
	Vesic		Hughes		Hansbo		Brauns		60mm		75mm		110mm	
	$Q_u$	$Q_a$	$Q_u$	$Q_a$	$Q_u$	$Q_a$	$Q_u$	$Q_a$	$Q_y$	$Q_a$	$Q_y$	$Q_a$	$Q_y$	$Q_a$
Crushed-stone pile	237	79	194	65	241	80	240	80	17.5	8.8	18.5	9.3	21.0	10.5
Sand pile	148	49	121	40	150	50	127	42	17.2	8.6	18.0	9.0	19.5	9.8

기존 제안식을 이용하여 계산한 결과, 팽창과괴에 대해서 Hansbo의 제안식이 가장 큰 값으로, Hughes의 제안식이 가장 작은 값으로 나타났다. 또한, 기존 제안식을 이용해 구한 허용 지지력 값이 실험을 통해 측정된 Granular pile의 허용 지지력 값과 차이가 있다. 이것은 일반적으로 점성토 지반에 Pile이 관입되면 주변지반이 교란되어 일시적으로 강도가 감소하기 때문에 점토지반 중에 Pile 관입 후 2~4주의 시간이 경과한 후에 재하 시험을 해야 하지만 본 시험에서는 각 단계별로 하중재하 30분후의 하중-침하량 곡선으로 지지력을 측정하였기 때문에 계산 지지력과 측정 지지력 사이에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 하지만, 시간이 지나가면서 틱소트로피(Thixotropy) 현상에 의해 지지력이 서서히 회복되므로 계산지지력과 측정지지력의 차이는 감소될 것으로 판단된다.

### 5.2 침하량 특성 비교

압밀시험을 통하여 얻은 시간-침하량 곡선으로 장기 침하량 결과를 계산해 현재 침하량의 결과와 비교 분석하여 보았다. 장기침하 예측기법의 적용성은 대상곡선의 직선부 기울기가 가장 중요한 역할을 하게 되므로 직선성의 확보가 중요하다.

압밀시험결과에서는 Crushed-stone pile의 침하량이 Sand pile과 원지반에 비해 많이 발생하였지만 Hyperbolic method에 의한 장기 침하량 예측결과, 1단계에서 Crushed-stone pile은 Sand pile에 비해 6%의 침하저감 효과를 보였고, 원지반에 비해서는 16%의 침하저감 효과를 보였다. 또한, 2단계에서는 Crushed-stone pile이 Sand pile에 비해 15%의 침하저감 효과를, 원지반에 비해 36%의 침하저감 효과를 보였다.



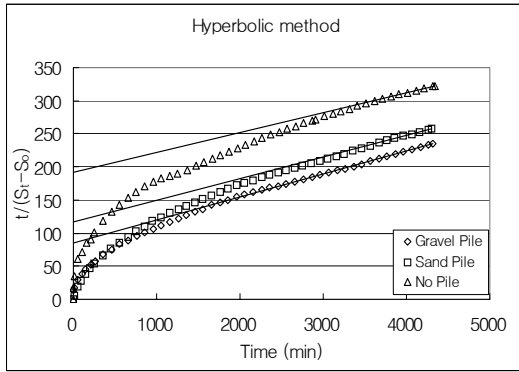


그림 9. 압밀 2단계 장기침하량 결과

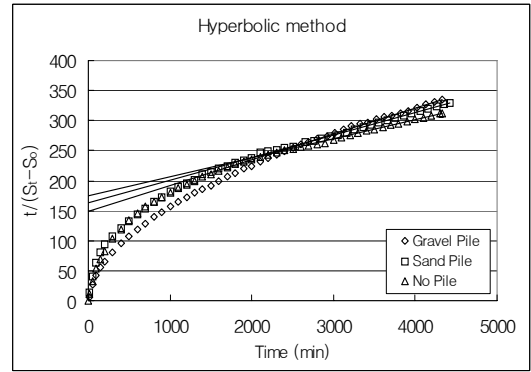


그림 8. 압밀 1단계 장기침하량 결과

표 5. 1, 2단계 장기침하 예측결과(Hyperbolic method)

	1단계 장기침하량 결과			2단계 장기침하량 결과		
	Crushed-stone pile	Sand pile	원지반	Crushed-stone pile	Sand pile	원지반
$\alpha$	0.0346	0.0326	0.0299	0.0431	0.0376	0.0318
$\beta$	85.17	117.26	192.28	148.04	163.00	174.84
$S_f(\text{mm})$	28.90	30.67	33.44	23.20	26.60	31.45
$S_t(\text{mm})$	18.39	16.74	13.48	12.96	13.44	13.86
$U(\%)$	63.63	54.57	40.31	55.86	50.53	44.07
$S_r(\text{mm})$	10.51	13.93	19.96	10.24	13.16	17.59

\*  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 계수,  $S_f$ 는 최종침하량,  $S_t$ 는 현재침하량,  $U$ 는 현재압밀도,  $S_r$ 은 잔류침하량

표 5와 같이 Pile이 있는 경우의 장기침하량 추정결과가 원지반에 비해 작게 추정되었다. 1단계 압밀시험에서 Crushed-stone pile의 채움재인 쇄석입자의 재배열로 인해 침하가 많이 발생하였지만 큰 강성의 입자 재배열이 이루어진 1단계 압밀시험 종료시점에서는 Hyperbolic method에서 침하량을 추정하는 직선부의 기울기가 작아지고 이로 인해 Crushed-stone pile의 장기 침하량 추정 결과가 Sand pile에 비해 작게 발생하였다고 판단된다. 또한, 2단계 압밀시험의 현재침하량 결과와 Hyperbolic method를 사용하여 장기침하량을 예측한 결과는 모두 Crushed-stone pile이 Sand pile과 원지반에 비해서 작게 나왔다.

## 6. 결론

본 연구에서 연약지반의 안정화를 위한 Crushed-stone

pile과 Sand pile의 지지력특성, 침하특성 및 배수특성 등의 공학적 특성을 비교 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1). S-logP법으로 구한 항복하중을 비교한 결과, Crushed-stone pile의 치환율이 16, 25, 54%로 높아짐에 따라 원지반에 비해 항복하중이 각각 99, 110, 139% 증가하였으며, Sand pile은 치환율이 16, 25, 54%로 높아짐에 따라 원지반에 비해 항복하중이 각각 95, 104, 122% 증가하였다.
- 2). 압밀시험 1단계 결과에서, Crushed-stone pile의 침하가 Sand pile의 침하보다 10%, 원지반 침하보다 36% 크게 발생하였지만 쇄석 재료간의 상대적인 변형으로 인한 입자의 재배열이 이루어지고 난 후인 2단계 결과에서는 Crushed-stone pile의 침하가 Sand pile의 침하보다 4%, 원지반 침하보다 7%의 작게 나타나 쇄석 재료의 강성에 따른 침하저감 효과를 볼

수 있다.

- 3). Hyperbolic method에 의한 장기침하량 예측 결과, 1 단계에서 Crushed-stone pile은 Sand pile에 비해 6%의 침하저감 효과를 보였고, 원지반에 비해서는 16%의 침하저감 효과를 보였다. 또한, 2단계에서는 Crushed-stone pile이 Sand pile에 비해 15%의 침하저감 효과를, 원지반에 비해 36%의 침하저감 효과를 보였다.
- 4). 간극수압 측정 결과, Granular pile에서 거리가 가까울수록 소산속도가 빠르고 최대과잉간극수압이 작게 나타났으며, Crushed-stone pile이 설치된 지반과 Sand pile이 설치된 지반은 시간 경과에 따른 과잉간극수압 소산정도가 유사하게 나타나는 결과를 보였다.

- 5). 모형토조를 통한 하중재하시험과 압밀시험에서는 Crushed-stone pile이 Sand pile에 비해 지지력과 침하저감 효과가 크게 나타났고, 과잉간극수압 소산에 있어서는 거의 유사한 특성을 보여, 모래의 대체재로서 쇄석의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

### 감 사 의 글

본 논문은 2001년 한국도로공사에서 지원하는 연구과제인 “도로기초지반 안정처리를 위한 저소음 저진동 Granular pile 공법의 실용화 연구”의 연구수행 결과의 일부임을 밝히며, 아울러 연구비를 지원해준 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2001. 11. 1)

### 참 고 문 헌

- 1). 천병식, 고용일, 여유현, 김백영(1999), “연약지반처리공법으로 시공된 자갈다짐 말뚝의 지지력 특성”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 387~390.
- 2). 한국지반공학회(1997), “얕은기초(지반공학 시리즈 2)”, p. 79
- 3). Miyakawa(1961), “軟弱地盤と盛土, 土と基礎の設計法(その3)”, 土質工學會, pp. 178~181.
- 4). 沈保漢(1983), “The Evaluation of The Vertical Bearing Capacity of Bored Cast-in-place Concrete Pile in China”, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 12, pp. 57~63.
- 5). Balaam, N. P., Poulos, H. G. and Brown, P. T.(1977), “Settlement analysis of soft clays reinforced with granular piles”, Proc Fifth Asian Regional Conf., Bangkok, Thailand, Vol. 1, pp. 81~92.
- 6). Barksdale, R. D. and Bachus, R. C.(1983), “Design and Construction of Stone Columns”, Vol. 1, Report No. FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, p. 195.
- 7). Das, B. M.(1989), “Bearing Capacity of Shallow Foundation on Granular Column in Weak Clay”, Foundation Engineering Current Principles and Practices, ASCE, Vol. 2, pp. 1252~1263.
- 8). Hansbo, S.(1994), “Foundation Engineering, Developments in Geotechnical Engineering”, Elsevier, Vol. 95, pp. 450~455.
- 9). Hughes, J. M. O. and Withers, N. J.(1974), “Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns”, Ground Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 42~49.
- 10). Van Impe, W. F. and Madhav, M. R.(1992), “Analysis and settlement of dilating stone column reinforced soil”, Austrian Geomech J, Feb-March, Vol. 137, pp. 114~121.
- 11). Vesic, A. S.(1972), “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. SM3, pp. 265~290.
- 12). Brauns, J.(1978), “Die Anfangstraglast von Schottersäulen im Bindigen Untergrund”, Die bautechnik, Vol. 8, pp. 263~271.