

# Granular Pile에 의한 연약지반의 개량효과

## Improvement Effects of Soft Ground by Granular Pile

천 병 식\*<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik

김 백 영\*<sup>2</sup> Kim, Baek-Yung

### Abstract

As construction cases of structure are increasing in the soft ground, the necessity of ground improvement is also increasing. Granular pile is one of the improvement methods for soft ground and for loose sandy soil. In domestic, 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 as 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 the substitute for sand.

### 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 문제 때문에 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 실내모형시험으로 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.

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

### 1. 서 론

우리나라는 국토면적이 적은데다 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 효율적인 국토이용을 위해 그동안 건설부

지로 잘 이용되어오지 않은 해안 등의 연약지반 개발의 필요성이 증대되고 있다.

우리나라 해안의 초연약지반은 대부분 높은 지하수위를 가지며 유동성이 큰 포화 점성토층이 깊은 심도로

\*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Civil Engrg., Institute of Technology, Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

\*2 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

분포하고 있고, 압밀진행성 점토로서 성토 등의 상재하중 재하시 압밀침하, 전단변형, 히빙 등으로 인한 복잡한 지반변형이 발생하므로 연약지반상에 구조물 설치가 필요한 경우 사전에 안정성을 확보하기 위한 연약지반처리공법의 적용이 필수적이라고 할 수 있다(천병식, 2001(a), (b)).

현재 주로 사용되어지고 있는 연약지반 처리공법으로는 치환공법, 재하공법, 배수공법, 진동다짐공법, 혼합처리공법 등이 있으며, Granular pile 공법은 이러한 연약지반을 개량하는 공법들 중 하나로 연약한 점성토 지반이나 느슨한 사질토 지반에 시공 시, 원지반과 Granular pile이 함께 거동하는 복합지반을 형성하게 되어 복합강도를 가지게 되므로 지지력증대, 침하저감 및 배수증진 효과를 기대할 수 있다.

국내에서는 모래를 이용한 SCP(Sand Compaction Pile) 공법은 1983년 광양제철단지 조성 이후로 많이 사용돼 왔지만, 쇄석을 이용한 Granular pile은 외국에 비해 그 사용실적이 미비한 실정이다. 그러나, 그간 대규모 토목공사에 건설재료로써 막대한 양이 사용되어온 모래는 현재 그 수요는 급증하고 있으나 재료 부족으로 인해 구득이 갈수록 어려워지는 실정으로 모래 재료의 고갈에 따른 환경적, 경제적인 문제를 해결하기 위하여 모래 대신 이용할 수 있는 대체재의 개발이 절실히 필요한 실정이다(천병식 등, 1999).

따라서, 본 연구에서는 연약해성점성토를 채운 모형토조에 쇄석과 모래로 면적치환비를 다르게 하여 각각의 파일을 형성하고 하중재하시험 및 압밀시험을 실시하여 쇄석파일과 샌드파일에 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.

### 2.1 지지력 이론

점성토지반에서 Granular pile의 극한하중은 Granular 재료의 내부마찰각과 주변 점성토의 전단강도에 크게 의존한다. Granular pile에 작용하는 응력상태는 지표면에 작용하는 하중에 의한 유효수직응력과 지반의 수평응력에 의한 유효방사응력으로 표현되는 삼축상태로 비교되어질 수 있다. 따라서 다음과 같은 요소들이 Granular pile의 거동에 영향을 주며, 하중이 작용할 때 발생하는 지반의 압밀은 보통 무시한다.

즉, 지반의 비배수 전단강도, 지반의 방사방향 응력-변형특성, 초기 Granular pile의 직경, Granular pile 재료의 응력-변형 특성과 내부마찰각 등이다.

### 2.2 장기침하 예측이론

이론적인 최종 침하량 예측은 실제지반의 불균질성, 지반변수들의 불확실성, 다차원적인 압밀특성 등으로 인해 실제 관측되는 침하량과 일치하지 않는 것이 일반적이다. 이론침하량과 실제 거동침하량이 일치하지 않는 한 이론적인 해석방법에 의해 현재 압밀진행상태와 압밀종료시점을 판단할 수 없게 된다. 그러므로 현재까지 진행된 현장계측자료의 침하거동과 설계시의 이론침하거동을 비교·분석한 후, 이 결과를 설계치에 보정하는 반복작업을 공사기간동안 되풀이하게 되면, 점진적으로 그 차이가 줄어들어 현장거동과 일치되는 이론침하거동의 보정치를 얻게 된다. 그리고 현장의 실제거동과 이론 예측거동이 일치하게 되면 현재 압밀진행 상태는 물론 압밀종료시점을 알아낼 수 있게 된다. Granular pile의 장기 침하 예측을 위해 기존의 침하해석 예측에 대한 여러 제안 식을 살펴보면 다음과 같다.

#### (1) Hyperbolic Method

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

$$\frac{t}{(S_t - S_0)} = \alpha + \beta \cdot t \quad (1)$$

여기서,  $S_t$ 은 임의의 시간  $t$ 에서의 침하량이며  $S_0$ 는 초기침하량,  $\alpha$ 는 종축절편,  $\beta$ 는 기울기이다.

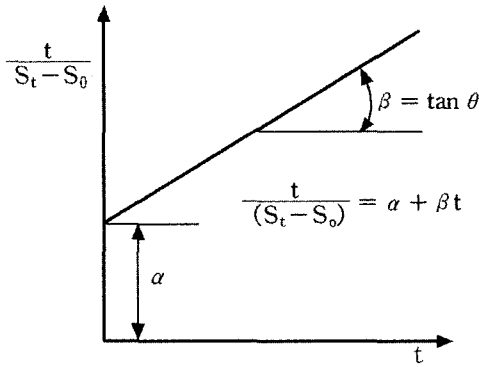
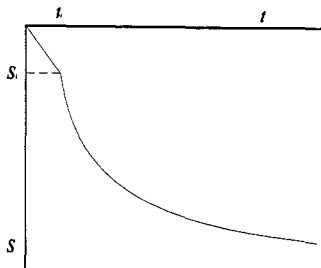


그림 1. Hyperbolic method

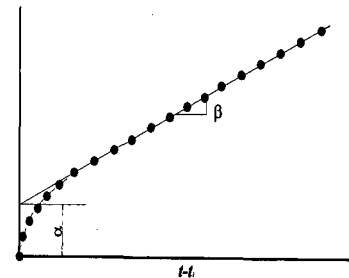
이 방법을 적용하여 추정된 침하량은 초기에는 실측치에 비하여 작고 후반부의 직선부분에서는 일치하는 경향이 있으므로 압밀도가 약 50%정도 도달해야만 어느 정도 근사치에 접근할 수 있는 것으로 알려져 있다.

(2)  $\sqrt{s}$  Method

$\sqrt{s}$  침하예측법(정성교 외, 1998)은 기존 예측방법의 적용에 있어 문제가 되고 있는 계측자료의 직선성을 확보하기 위해 압밀침하량의 제곱근과 시간을 쌍곡선적인 관계로 가정하였다.

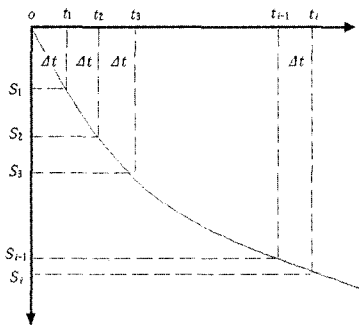


(a) st 곡선

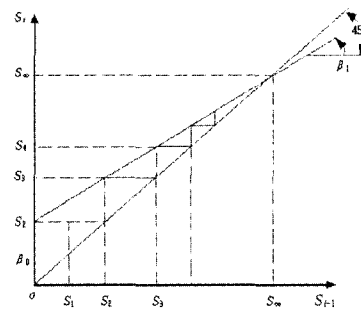


(b)  $(t - t_1) / (\sqrt{S - S_1}) : (t - t_1)$

그림 2.  $\sqrt{s}$  method(정 외, 1998)



(a) 시간-침하 곡선



(b) 최종 침하

그림 3. Asaoka method(Asaoka, 1978)

$$\frac{t}{\sqrt{s}} = \alpha + \beta \cdot t \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 직선의 절편,  $\beta$ 는 직선의 기울기이다. 이 방법은 기존의 침하예측기법에서와 같이 필요한 시기에 침하량을 초기화할 수 있는 방법으로 매우 유용하다. 따라서, 임의시간 이후로부터 도시할 경우 식 (2)은 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_f = S_i + \frac{1}{\beta^2} \quad (3)$$

여기서,  $S_i$ 는 임의시간  $t_i$ 에서 측정된 침하량이다.

(3) Asaoka Method

Asaoka(1978)는 압밀이론을 수학적으로 처리하여 최종침하량 및 압밀계수 그리고 중간 침하량을 구하고 있다. 1차원 압밀방정식을 이용하여 현장 침하자료로부터 임의의 시점에서의 침하량을 구할 수 있는 도식적 방법으로서, 측정된 침하자료를 일정한 시간간격으로 끊어서 이 때의 침하량을 각각  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_n, S_\infty$ 라 하고,  $S_n$ 을 종축에  $S_{n-1}$ 을 횡축에 도시한다. 도시된  $S_n - S_{n-1}$ 의 관계는 일정한 기울기를 갖는 직선형태

를 나타내다가 시간이 무한대가 되면  $S_n = S_{n-1}$ 의 직선과 교차되어 최종침하량  $S_\infty$ 를 구할 수 있다. 또한 임의의 시간  $t$ 에서의 침하량은 다음 식에 의하여 예측된다.

$$S_t = S_f - (S_f - S_0) \times \exp(-t/a_1) \quad (4)$$

$$S_f = \frac{\beta_0}{(1 - \beta_1)} \quad (5)$$

여기서,  $S_t$ ,  $S_f$ 는 각각 임의의 시간  $t$ 와 시간  $\infty$ 에서의 침하량,  $S_0$ 는 시점에서의 침하량,  $a_1 = (5/12) \times (h^2/C_v)$ ,  $h$ 는 압밀층의 두께,  $\beta_0$ 와  $\beta_1$ 는 각각  $S_n - S_{n-1}$ 관계도의 절편과 기울기,  $\Delta t$ 는 시간간격이다.

그러나 이 방법은 지반에 따라 기울기가 직선이 되지 않는 경우가 발생하기도 하며, 이런 경우는 보다 오랜 기간동안의 침하자료가 수집되어야만 하는 단점이 있다. Asaoka method는 성토기간이 길면  $\beta_0$  값이 커지는 결과를 가져오며 시간간격  $\Delta t$ 를 길게 잡을수록 정확도가 높고, 압밀도 60%정도에서도 비교적 장래침하량을 잘 예측할 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·소성한계, 삼축압축시험을 실시한 결과 우리나라 해성점성토에서 많이 볼 수 있는 통일분류법상 CH이며, 비중은 2.7, 액성한계는 82.87%, 소성한계는 31.03%였다. 삼축압축시험(UU test) 결과 비배수전단강도는 5kPa로 나타났다.

Pile을 형성하기 위한 채움재로서 쇄석은 25mm이하

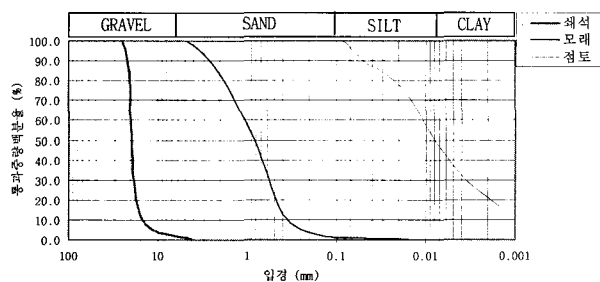


그림 4. 점토와 Granular 재료의 입도분포곡선

의 인공쇄석골재(Crushed-stone)를 이용하고 모래는 일반모래를 이용하였으며 채움재의 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 체분석시험, 다짐시험, 대형직접전단시험, 삼축압축시험을 실시한 결과 쇄석의 경우 비중은 2.67 내부마찰각은 45°, 통일분류상 GP이고, 모래의 경우 비중은 2.62, 내부마찰각은 34.7°, 통일분류상 SP로 분류되었다.

#### 3.2 모형지반 제작 및 Granular Pile 설치

모형지반 제작을 위해 모형토조를 이용하였으며, 그림 5의 모형토조 바닥에 8개의 직경 3mm 배수구를 만들어 시험하였다. 내부의 벽면은 평면변형률 조건을 위하여 비닐을 씌워 성형하였고 하부 Sand mat를 포설한 후에 점성토 지반을 형성하였으며 다시 상부 Sand mat를 포설하였다. 점성토 지반 형성 후, Granular pile이 설치될 위치의 중심으로부터 파일직경별(1.0D, 1.5D, 2.0D), 심도별 (10cm, 30cm)로 실내 배인전단시험을 실시하여 최대한 동일한 전단강도를 지니도록 모형지반을 형성하였다. 모형지반은 물성치가 파악된 남해안 김해 지역의 실트질 점토를 이용하여 원지반 함수비인 약 70%로 맞추어 토조에 넣었으며, 시험에 사용된 쇄석은 충분히 세척한 후 노건조하여 사용하고, 모래는 공기 건조하여 사용하였다. 시험 원지반 상·하부의 수평배수층(Sand mat층)은 그림 4의 입도분포를 가진 모래를 이용하여 50mm의 두께로 포설하였다.

Granular pile의 설치는 미리 PVC관을 설치하고 제작한 모형지반을 하루동안 자중압밀시킨 후, 공벽의 붕괴를 방지하기 위해 삽입된 PVC관을 일정간격으로 인력

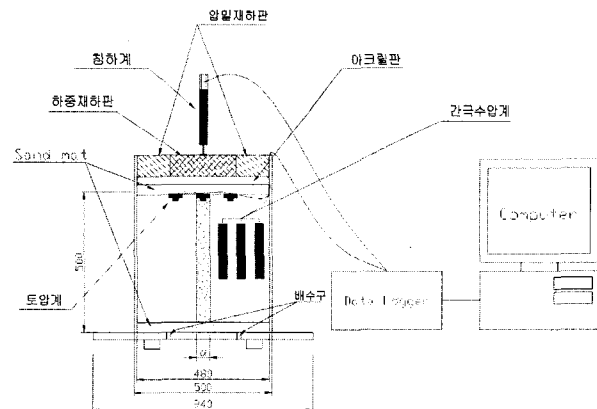


그림 5. 모형토조

으로 인발하며 Granular 재료를 다져 넣었으며, 인발시의 교란을 최소로 하기 위해 PVC관 표면을 윤활제로 도포하였다.

### 3.3 하중재하시험

쇄석파일과 샌드파일이 복합지반의 지지력 특성에 어떠한 영향을 주는가를 파악하기 위하여 쇄석파일 설치지반과 샌드파일 설치지반 그리고 원지반에 대하여 하중재하시험을 실시하였다. 쇄석파일과 샌드파일의 특성을 비교해보기 위하여 Unit cell이론(Balaam 등, 1977; Van Impe와 Madhav, 1992)에 근거하여 점성토와 Pile의 침하를 동일하다고 가정하고 강성재하 조건을 적용하였으며, 재하판은 지름 150mm, 두께 25mm로 변형에 충분히 견딜 수 있는 강철판을 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.

### 3.4 압밀시험

쇄석파일과 샌드파일이 복합지반의 압밀침하특성, 배수특성에 어떠한 영향을 주는가를 파악하기 위하여 쇄석파일 설치지반과 샌드파일 설치지반 그리고 원지반에 대하여 모형압밀시험을 실시하였다. 강성재하 조건을 적용하였으며, 상부 Sand mat 위로 균등한 하중재하를 위하여 지름 479mm, 두께 10mm의 아크릴판을 설치하고 그 위에 변위에 충분히 견딜 수 있는 지름 460mm, 두께 25mm의 강철판과 지름 765mm, 두께 25mm의 강철

판 그리고 10kg의 추 24개를 이용하였다. Pile 설치 지름은 110mm로 하여 단계별 성토에 따른 시간-침하량 관계를 분석하기 위하여 10kPa의 하중을 압밀재하한 후 다시 10kPa를 추가하여 20kPa의 두 단계로 압밀재하 하였으며 재하시간은 한 단계에 4320분씩, 두 단계로 총 8640분 동안 재하하였다.

### 3.5 계측방법

하중재하시험시 모형지반 상부에 LVDT 변위계를 설치하였으며, 토압계를 Pile 상부에 1개소, 점토지반 상부에 2개소 설치하였다. 압밀시험시에도 모형지반 상부에 LVDT 변위계를 설치하였으며 파일 상부에 1개소, 점토지반 상부에 2개소의 토압계(NGI, GW-2K, 용량: 2kgf/cm<sup>2</sup>)를 설치하고 Pile 중심에서 1.0D, 1.5D, 2.0D(D : 파일직경) 간격으로 진동현식 간극수압계(NGI, SP-05K, 용량: 0.1kgf/cm<sup>2</sup>)를 설치하였다.

## 4. 시험결과

### 4.1 하중재하시험 결과

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

S-logP법에 의해 지지력을 구한 결과, 표 1에서와 같이 치환율이 16, 25, 54%로 높아짐에 따라 쇄석파일은 원지반에 비해 항복하중( $q_y$ )이 99, 110, 139% 증가하였으며, 샌드파일은 95, 104, 122% 증가하였다. 이것은

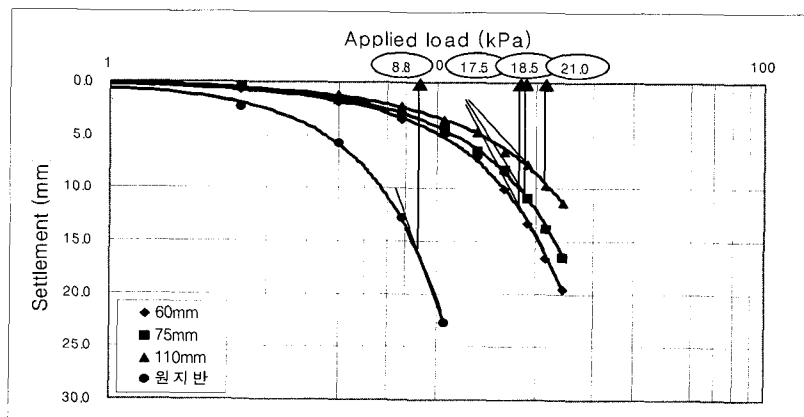


그림 6. 치환율에 따른 쇄석파일의 하중-침하곡선 (S-logP법)

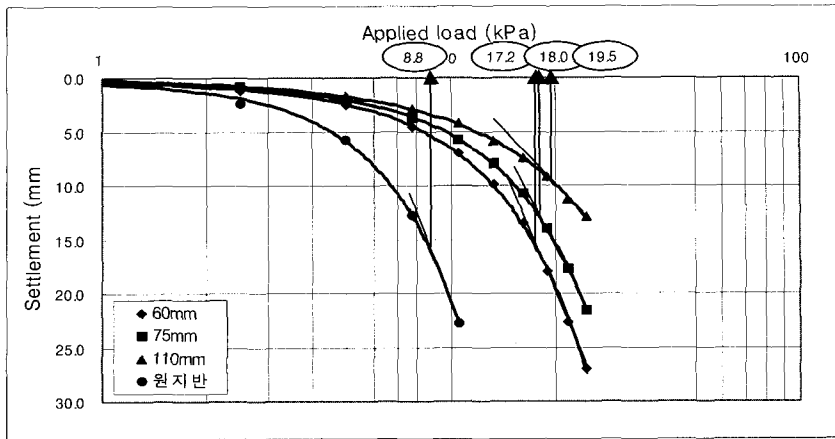
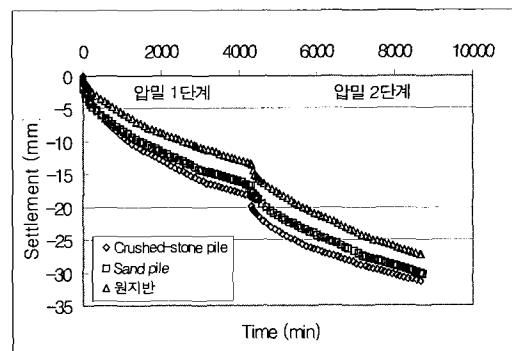


그림 7. 치환율에 따른 샌드파일의 하중-침하곡선 (S-logP법)

표 1. 치환율에 따른 Granular pile의 극한지지력의 변화

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



(a) 압밀 1, 2 단계 시간-침하곡선

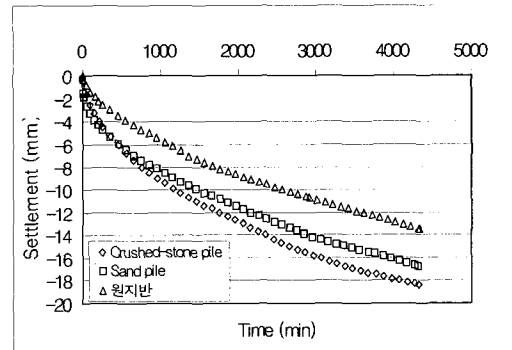
강성이 큰 Pile 설치로 인한 원지반과 Pile의 복합적인 거동에 의해 지지력 특성이 개선된 것으로 판단되며 샌드파일에 비해 쇄석파일의 지지력이 다소 높게 나왔다.

#### 4.2 압밀시험 결과

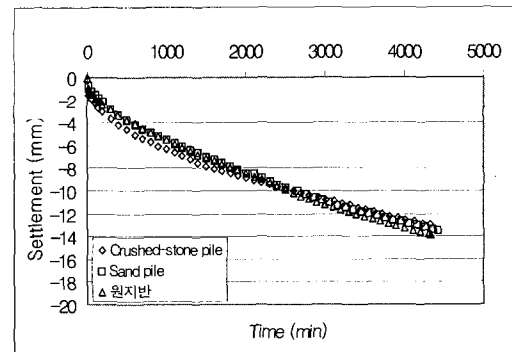
그림 8은 압밀 단계에 따른 시간-침하 특성을 분석하기 위하여 압밀 1단계와 2단계로 구분한 시간-침하 곡선이다. 압밀 1단계에서 쇄석파일 설치시의 발생침하는 샌드파일 설치시에 비해 10% 크게 발생하고 원지반에 비해 36% 크게 발생하였지만, 압밀 2단계에서는 쇄석파일의 침하가 샌드파일에 비해 4% 작게 발생하고 원지반에 비해 7% 작게 발생하였다. 압밀 1단계에서는,

표 2. Granular pile의 시간-침하량 결과

	1단계 침하량(mm)	2단계 침하량(mm)	전체 침하량(mm)
쇄석파일	18.39	12.96	31.35
샌드파일	16.74	13.44	30.18
원지반	13.48	13.86	27.34

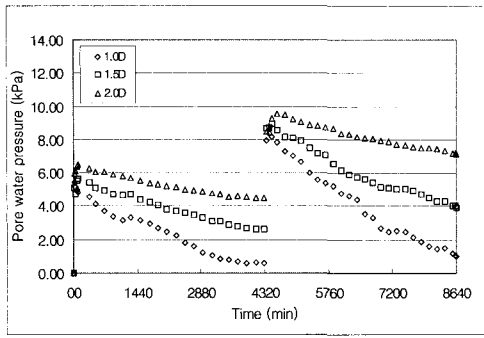


(b) 압밀 1단계 시간-침하곡선

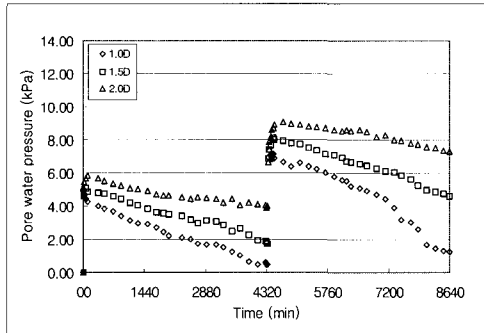


(c) 압밀 2단계 시간-침하곡선

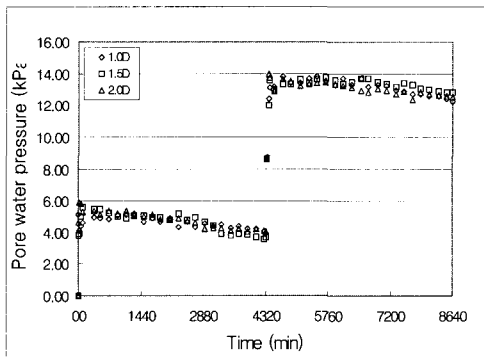
그림 8. 압밀 1, 2단계 시간-침하곡선



(a) 쇄석파일 설치지반 간극수압 변화



(b) 샌드파일 설치지반 간극수압 변화



(c) 원지반 간극수압 변화

그림 9. Granular pile별 간극수압

재하로 인한 응력의 증가로 인해 쇄석파일의 채움재인 쇄석 입자의 느슨한 구조가 붕괴되면서 샌드파일과 원지반에 비해 침하가 많이 발생한 것으로 보이며, 압밀 2단계에서는 밀실화한 쇄석 파일의 강성증대로 인하여 침하저감효과가 나타난 것으로 판단된다.

그림 9와 같이 1, 2단계로 구분한 쇄석파일과 샌드파일의 과잉간극수압은 1, 2단계 모두 하중재하 초기에 최대치에 도달 후 점차 소산되기 시작하였으며, Pile에서 거리가 가까울수록 소산속도가 빠르고 최대과잉간극수압이 작게 나타났다. 쇄석파일은 샌드파일과 비교하여 시간 경과에 따른 과잉간극수압 소산정도가 크거나 유사하게 나타나고 있는 것으로 분석되며, 파일을 설치하지 않은 원지반에서는 1, 2단계 모두 거리별에 상관없이 과잉간극수압의 소산속도가 느리게 나타났다.

## 5. 수치해석 결과

### 5.1 수치해석 모형

SIGMA/w 프로그램을 이용한 해석에 사용된 모형의 개요는 그림 10과 같으며, 실내모형시험과 같이 강성재하 해석을 실시하였다. 단일 Granular pile에 대하여 Pile 직경을 변화시켜 가면서 치환율 16%, 25%, 54%에 대하여 해석을 수행하였다. 수치해석에서 지층의 두께와 폭은 실내 모형시험 결과와의 비교를 위하여 각각 40cm, 48cm를 사용하였으며 수치해석시 모델지반과 경계면에서의 주변마찰이 발생하지 않도록 모델링하였다. 해석에 사용된 물성치는 Ganular Pile은 설계시 일반적으로 사용되는 물성치를 사용하였으며, 점토지반의 물성치는 각종 물성시험 및 역학시험을 통하여 측정된 값을 사용하였다(표 4 참조).

표 3. Granular pile의 간극수압 측정결과

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

\* ( )는 최대 과잉간극수압에 이르는 시간(min)

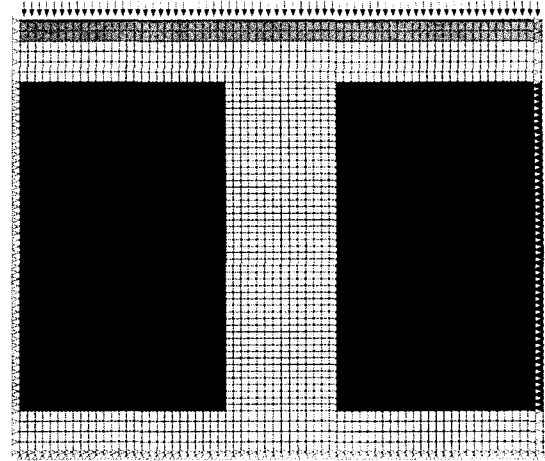
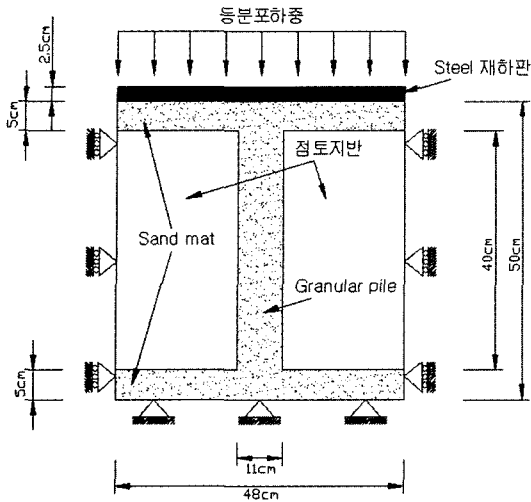


그림 10. 수치해석 모형 개요

표 4. 해석에 사용된 물성치

재료	모델	탄성계수 (kPa)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	점착력 계수 (kN/m <sup>2</sup> )
모래	Elastic-Plastic model	20,000	0	34.7°	0.3
		100,000	0	45°	0.3
점토	Cam-Clay model	0.4	0.0796	0.0096	1.83
					3.439
					1E-6
					5

## 5.2 수치해석 결과

SIGMA/w 프로그램을 이용하여 모형토조를 이용한 압밀시험을 재현하여 해석하였다. 압밀단계도 모형토조

표 5. 수치해석에 의한 Granular pile의 시간-침하량 결과

	1단계 침하량(mm)	2단계 침하량(mm)	전체 침하량(mm)
쇄석파일	27.60	14.49	42.09
샌드파일	23.76	11.68	35.44
원지반	20.11	12.15	32.26

표 6. Granular pile의 간극수압 측정결과

	과잉간극수압 (kPa)	1단계 압밀시험 완료 후	2단계 압밀시험 완료 후
		과잉간극수압 (kPa)	과잉간극수압 (kPa)
쇄석파일	1.0 D	0.65	1.12
	1.5 D	2.12	3.76
	2.0 D	3.96	7.75
샌드파일	1.0 D	0.41	2.44
	1.5 D	1.47	5.56
	2.0 D	3.68	8.75
원지반	1.0 D	4.51	13.45
	1.5 D	4.79	15.92
	2.0 D	5.02	17.37

시험과 같이 1단계와 2단계로 나누어 해석하였으며, 그 결과는 표 5, 표 6과 같다. 표 5에 의하면, 압밀 1단계에서는 모형토조시험과 마찬가지로 발생침하가 쇄석파일, 샌드파일, 원지반의 순으로 나타났지만, 압밀 2단계에서는 모형토조시험 결과와는 달리 침하발생이 압밀 1단계와 마찬가지로 쇄석파일이 가장 크게 나타났다. 표 6에 의하면 Pile에서 거리가 가까울수록 과잉간극수압의 소산속도가 빠르다는 것을 알 수 있었으며, 이는 모형토조시험 결과와 동일한 경향을 나타냈다.

## 6. 결과분석 및 고찰

### 6.1 지지력 특성 비교

S-logP법에 의해 지지력을 구한 결과, 치환율이 높아짐에 따라 쇄석파일과 샌드파일 모두 원지반에 비해 항복하중( $q_y$ )이 증가하였으며, 이것은 강성이 큰 Pile 설치로 인한 원지반과 Pile의 복합적인 거동에 의해 지지력 특성이 개선된 것으로 판단되며 샌드파일에 비해 쇄석파일의 지지력이 다소 높게 나왔다.



## 6.2 침하량 특성 비교

압밀시험을 통하여 얻은 시간-침하량 곡선으로 장기 침하량 결과를 계산해 현재 침하량의 결과와 비교 분석 하여 보았다.

Hyperbolic method에 의한 장기 침하량 예측결과, 1 단계에서 쇄석파일은 샌드파일에 비해 6%의 침하저감 효과를 보였고, 원지반에 비해서는 14%의 침하저감 효과를 보였다. 또한, 2단계에서는 쇄석파일이 샌드파일에 비해 13%의 침하저감 효과를, 원지반에 비해 26%의 침하저감 효과를 보였다(그림 11, 표 7 참조).

$\sqrt{s}$  method에 의한 장기 침하량 예측결과, 1단계에서 쇄석파일은 샌드파일에 비해 2%의 침하저감 효과를 보였고, 원지반에 비해서는 5%의 침하저감 효과를 보였다. 또한, 2단계에서는 쇄석파일이 샌드파일에 비해 5%의 침하저감 효과를, 원지반에 비해 15%의 침하저감 효과를 보였다(그림 12, 표 8 참조).

Asaoka method에 의한 장기 침하량 예측결과, 1단계에서 쇄석파일은 샌드파일에 비해 2%의 침하저감 효과를 보였고, 원지반에 비해서는 6%의 침하저감 효과를 보였다. 또한, 2단계에서는 쇄석파일이 샌드파일에 비해 20%의 침하저감 효과를, 원지반에 비해 28%의 침하

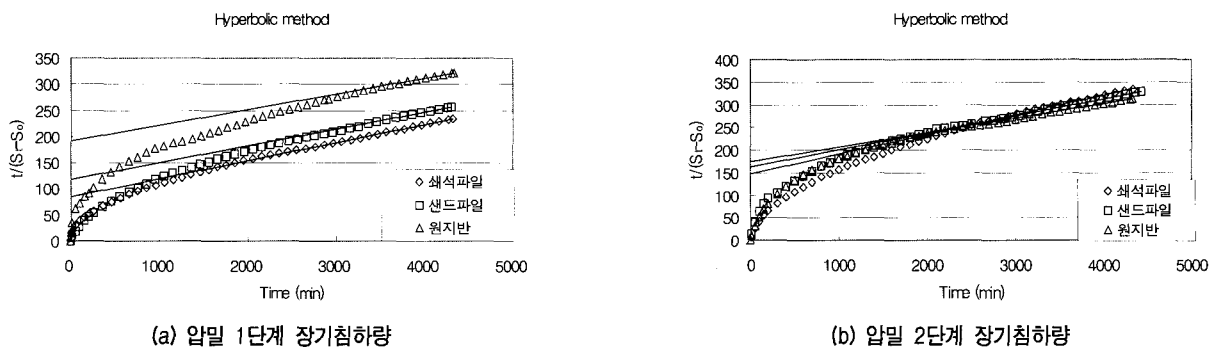


그림 11. Hyperbolic method에 의한 장기침하량 예측 결과

표 7. 1, 2단계 장기침하 예측결과 (Hyperbolic method)

	1단계 장기침하량 결과			2단계 장기침하량 결과		
	쇄석파일	샌드파일	원지반	쇄석파일	샌드파일	원지반
$\alpha$	85.17	117.26	192.28	148.04	163.00	174.84
$\beta$	0.0346	0.0326	0.0299	0.0431	0.0376	0.0318
$S_f$ (mm)	28.90	30.67	33.44	23.20	26.60	31.45
$S_t$ (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
$S_r$ (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, U는 현재압밀도,  $S_r$ 은 잔류침하량

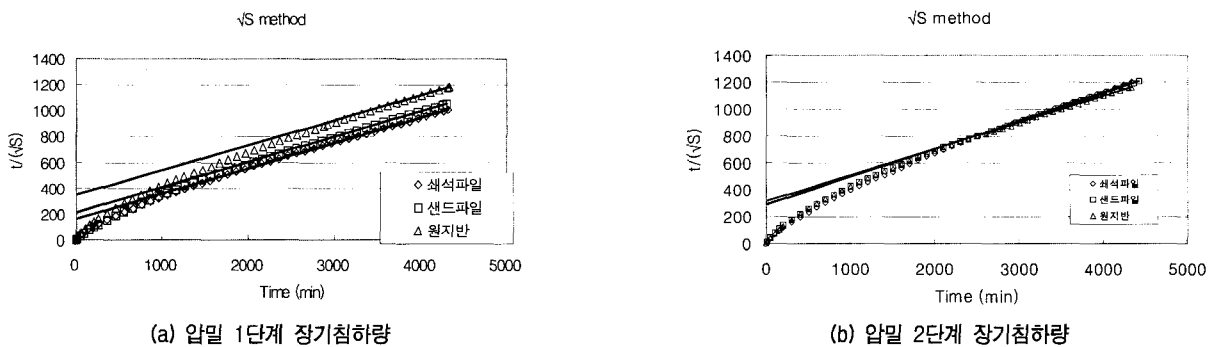


그림 12.  $\sqrt{s}$  method에 의한 장기침하량 예측 결과

표 8. 1. 2단계 장기침하 예측결과 ( $\sqrt{s}$  method)

	1단계 장기침하량 결과			2단계 장기침하량 결과		
	쇄석파일	샌드파일	원지반	쇄석파일	샌드파일	원지반
$\alpha$	161.23	214.37	348.39	279.19	287.59	314.51
$\beta$	0.1966	0.1951	0.1921	0.2133	0.2080	0.1961
$S_f(\text{mm})$	25.87	26.27	27.10	21.98	23.11	26.00
$S_i(\text{mm})$	18.39	16.74	13.48	12.96	13.44	13.86
U(%)	71.08	63.72	49.74	58.96	58.15	53.30
$S_r(\text{mm})$	7.48	9.53	13.62	9.02	9.67	12.14

\*  $\alpha, \beta$ 는 계수,  $S_f$ 는 최종침하량,  $S_i$ 는 현재침하량, U는 현재압밀도,  $S_r$ 은 잔류침하량

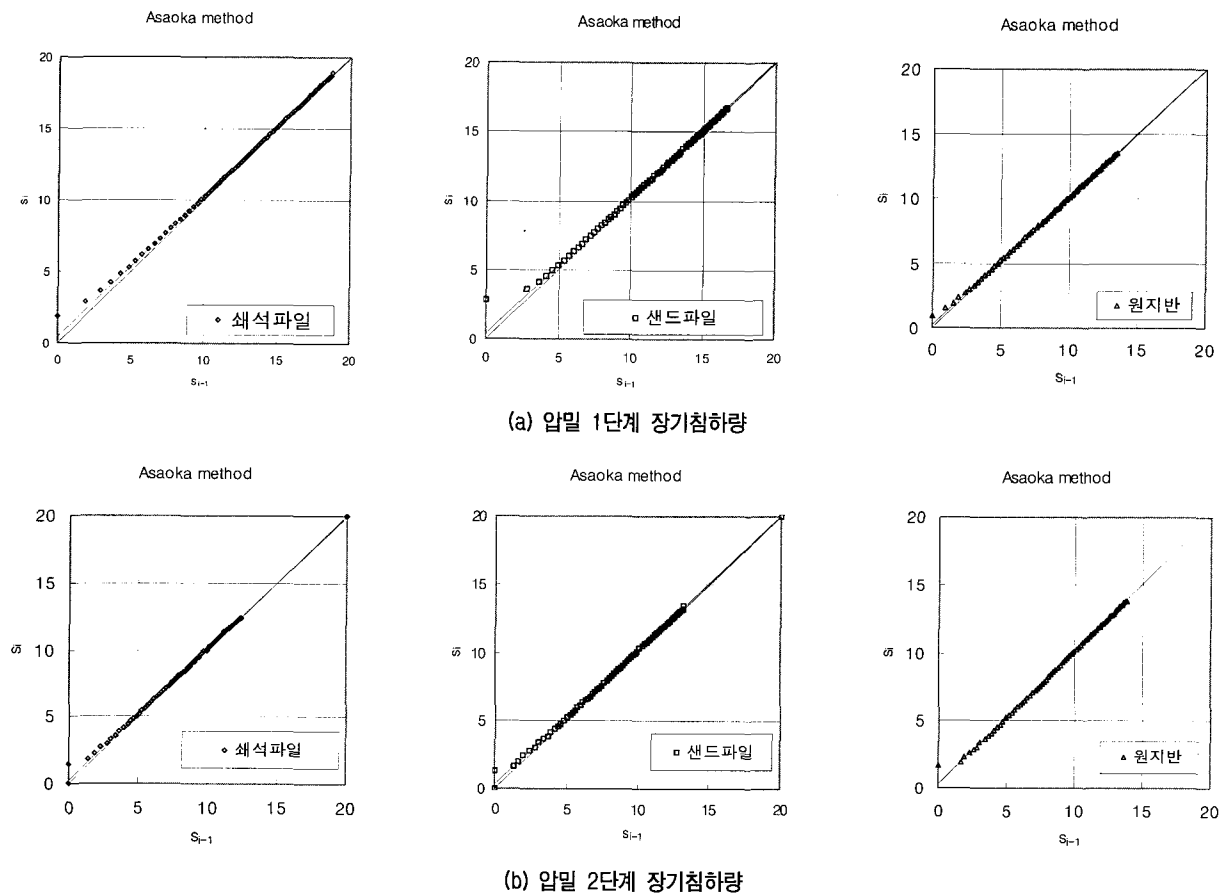


그림 13. Asaoka method에 의한 장기침하량 예측 결과

표 9. 1. 2단계 장기침하 예측결과 (Asaoka method)

	1단계 장기침하량 결과			2단계 장기침하량 결과		
	쇄석파일	샌드파일	원지반	쇄석파일	샌드파일	원지반
$\beta_0$	0.4730	0.3305	0.2200	0.2588	0.2582	0.2602
$\beta_1$	0.9798	0.9862	0.9912	0.9849	0.9879	0.9891
$S_f(\text{mm})$	23.42	23.95	25.00	17.14	21.34	23.87
$S_i(\text{mm})$	18.39	16.74	13.48	12.96	13.44	13.86
U(%)	78.54	69.90	53.92	75.62	62.98	58.06
$S_r(\text{mm})$	5.03	7.21	11.52	4.18	7.9	10.01

\*  $\beta_0, \beta_1$ 은 각각 직선의 절편과 기울기,  $S_f$ 는 최종침하량,  $S_i$ 는 현재침하량, U는 현재압밀도,  $S_r$ 은 잔류침하량

저감 효과를 보였다(그림 13, 표 9 참조).

1단계 압밀시험은 쇄석파일의 침하가 샌드파일과 원지반 침하량에 비해 침하량이 많이 나왔으나 Hyperbolic,  $\sqrt{s}$ , Asaoka method에 의해 장기 침하량을 예측한 결과 쇄석파일의 침하량이 샌드파일과 원지반에 비해 작게 나옴을 알 수 있다.

1단계 압밀시험은 쇄석파일의 채움재인 쇄석재료간의 상대적인 변형으로 인한 입자의 재배열이 이루어지고, 재하로 인한 응력의 증가로 엇물림현상이 발생하여 쇄석파일 내의 느슨한 구조가 붕괴되면서 침하가 많이 발생하였다. 그러나 2단계 압밀시험에서는 쇄석재료가 점차 조밀하게 다져지고 큰 강성의 입자 재배열이 이루어져서 Hyperbolic,  $\sqrt{s}$ , Asaoka method에 의한 침하량을 예측할 수 있는 곡선 후반 직선부의 기울기가 작아지게 되어, 장기 침하 예측시 예상침하량이 작게 평가된 것으로 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서 연약지반의 안정화를 위한 쇄석파일과 샌드파일의 지지력특성, 침하특성 및 배수특성 등의 공학적 특성을 비교 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) S-logP법으로 구한 항복하중을 비교한 결과, 쇄석파일의 치환율이 16, 25, 54%로 높아짐에 따라 원지반에 비해 항복하중이 각각 99, 110, 139% 증가하였으며, 샌드파일은 치환율이 16, 25, 54%로 높아짐에 따라 원지반에 비해 항복하중이 각각 95, 104, 122% 증가하였다.
- (2) 압밀시험 1단계 결과에서, 쇄석파일의 침하가 샌드파일의 침하보다 10%, 원지반 침하보다 36% 크게 발생하였지만, 쇄석 재료간의 상대적인 변형으로 인한 입자의 재배열이 이루어지고 난 후의 2단계 결과에서는 쇄석파일의 침하가 샌드파일의 침하보다 4%, 원지반 침하보다 7%의 작게 나타나 쇄석 재료의 강성에 따른 침하저감 효과를 볼 수 있다.
- (3) 각 침하량 제안식에 의해 장기 침하량을 예측한 결과, Hyperbolic method >  $\sqrt{s}$  method > Asaoka method 순으로 침하량이 크게 발생하였으며, 모형토조를 통한 하중재하시험과 압밀시험에서는 쇄석파일이 샌드파일에 비해 지지력과 침하저감 효과가 크게 나타났고, 과잉간극수압 소산에 있어서는 거의 유사

한 특성을 보였다.

- (4) 간극수압 측정 결과, Granular pile에서 거리가 가까울수록 소산속도가 빠르고 최대과잉간극수압이 작게 나타났으며, 쇄석파일이 설치된 지반과 샌드파일이 설치된 지반은 시간 경과에 따른 과잉간극수압 소산정도가 유사하여 양호한 배수특성을 확인할 수 있었다.
- (5) 수치해석 결과, 압밀 1단계에서는 모형토조시험과 마찬가지로 발생침하가 쇄석파일, 샌드파일, 원지반의 순으로 나타났지만, 압밀 2단계에서는 모형토조시험 결과와는 달리 침하발생이 압밀 1단계와 마찬가지로 쇄석파일이 가장 크게 나타났다. 또한, Pile에서 거리가 가까울수록 과잉간극수압의 소산속도가 빠르다는 것을 알 수 있었으며, 이는 모형토조시험 결과와 동일한 경향을 나타냈다.
- (6) 본 연구 결과, 쇄석파일이 샌드파일에 비해 지지력과 침하저감 효과가 크게 나타났고, 과잉간극수압 소산에 있어서도 거의 유사한 특성을 보여, 모래의 대체재로서 쇄석의 활용이 가능한 것으로 판단된다.

## 감사의 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.

## 참고 문헌

1. 이인모(1997), 얇은기초(지반공학 시리즈 2), 한국지반공학회, 서울, p.79.
2. 정성교, 최관희, 최호광, 조기영(1998), “압밀해석을 위한  $\sqrt{s}$  예측기법”, 한국지반공학회, Vol.14, No.2, pp.41-52.
3. 천병식, 고용일, 여유현, 김백영(1999), “연약지반처리공법으로 시공된 자갈다짐 말뚝의 지지력 특성”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.387-390.
4. 천병식(2001a), “연약지반 심층개량을 위한 Stone Column 공법 적용성에 관한 연구”, 한양대학교 산업과학논문집(48), pp.25-33.
5. 천병식(2001b), 도로기초지반 안정처리를 위한 저소음 저진동 Granular Pile공법의 실용화 연구, 한국도로공사, 서울, pp.1-8.
6. 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.
7. 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.

8. Asaoka, A.(1978), "Observational Procedure of Settlement Prediction", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, pp.87-101.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Hansbo, S.(1994), *Foundation Engineering, Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, Vol.95, pp.450-455.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Brauns, J.(1978), *Die Anfangstraglast von Schottersäulen im Bindigen Untergrund*, *Die bautechnik*, Vol.8, pp.263-271.

(접수일자 2002. 4. 1, 심사완료일 2002. 9. 23)