

삼축압축시험을 통한 모래다짐말뚝 공법과 팩말뚝 공법의 거동특성 비교

유완규¹, 김병일^{1*}, 이승현²
¹명지대학교 토목환경공학과, ²선문대학교 토목공학과

Comparison of the Behavior Characteristics between Sand Compaction Pile and Pack Pile by the Triaxial Compression Tests

Wan-Kyu Yoo¹, Byoung-II Kim^{1*} and Seung-Hyun Lee²

¹Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University

²Dept. of Civil Eng., Sunmoon University

요약 이 연구에서는 팩 말뚝과 모래다짐말뚝의 전단강도 특성을 비교하기 위해 모래-팩-점토 복합토 및 모래-점토 복합토를 인위적으로 치환율(a_s) 10%, 20%로 재성형하여 구속압력을 변화시켜가며 삼축압축시험(CU Test)을 실시하였다. 시험결과 모래-점토 복합토에 비해 모래-팩-점토 복합토의 강도가 치환율 10% 및 20% 모두에서 훨씬 크게 측정되어 모래다짐말뚝보다 팩말뚝이 큰 지지력을 갖는다는 것을 확인하였다.

Abstract In this study, a series of triaxial compression tests(CU) were performed with artificially remolded sand-pack-clay and sand-clay composite soils at 10% and 20% replacement ratio to compare the shear strength and behavior characteristics between sand compaction pile and pack pile. From the test results, the shear strength of the pack pile is much higher than the that of the sand compaction pile.

Key Words : Pack pile, Sand compaction pile, Shear strength, Behavior characteristics, Composite soil, Triaxial compression test

1. 서론

우리나라 해안지대의 연약지반을 개량하는 공법으로 최근까지 모래다짐말뚝(sand compaction pile)공법, 자갈다짐말뚝(gravel compaction pile)공법, 쇠석기둥(stone column)공법 등이 자주 사용되어 왔다[1]. 하지만 이러한 공법들은 자원의 고갈 현상 및 재료의 가격이 날로 상승하고 있으며, 공사에 필요한 재료를 충분히 확보하기가 어려워 이러한 공법들을 대체할 수 있는 공법에 대한 연구에 관심이 높아지고 있다.

국내외에서 최근 새로운 공법으로 개발되고 있는 팩말뚝(pack pile)공법이 있다. 팩말뚝 공법은 골재말뚝의 외벽을 소정의 인장강도를 갖는 토목섬유로 보강하여 속

채움 재료의 소모량을 줄이면서 지반의 지지력 및 전단저항을 증가시키고, 압밀침하량을 감소시키는데 그 목적이 있다[2]. 하지만 아직 팩말뚝 공법에 대한 많은 연구가 진행되지 않아 팩말뚝이 시공된 지반의 거동특성을 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 팩말뚝이 시공된 복합지반의 거동특성을 파악하기 위해서는 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

이 연구에서는 연약지반에 팩말뚝이 시공된 복합지반을 모사하는 모래-팩-점토 복합토와 모래다짐말뚝이 시공된 복합지반을 모사하는 모래-점토 복합토에 대하여 삼축압축시험을 실시하여 두 공법의 강도특성을 비교하고자 하였다.

*교신저자 : 김병일(bikim@mju.ac.kr)

접수일 10년 08월 19일

수정일 (1차 10년 09월 14일, 2차 10년 09월 29일)

계재확정일 10년 10월 15일

2. 시험내용 및 시험에 사용된 재료

2.1 시험내용

이 연구에서는 기존 사용되던 모래다짐말뚝과 새로운 공법인 팍 말뚝이 시공된 복합지반의 강도 및 거동특성을 비교하기 위하여 인위적인 복합토 시료를 만들어 삼축압축시험을 실시하였다. 기존 고 치환율(a_s) 모래다짐말뚝을 대체할 수 있는 저치환율 모래-팍-점토 복합토의 적용성 파악을 위하여 10% 및 20%의 저 치환율로 조성된 모래-점토, 모래-팍-점토 복합토의 삼축압축시험을 실시하였으며, 모래-팍-점토 복합토의 경우 인장강도가 다른 두 종류의 팍을 이용하여 팍의 인장강도에 따른 거동특성을 파악하였다.

2.2 시험에 사용된 재료

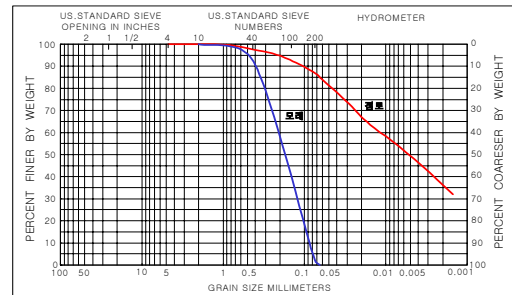
2.2.1 시험에 사용된 흙

모래-점토, 모래-팍-점토 복합토의 삼축압축시험에서 사용된 흙은 부산연약지반에서 채취한 해상점토 그리고 시험을 위해 적당한 입도로 체가름한 모래가 사용되었다. 점토의 경우 균질한 재료를 얻기 위해 불순물을 제거하고 재료를 끓여서 포화도를 높였다. 모래는 2mm 이하의 시료를 사용하기 위하여 체가름을 실시하였다. 모래 시료의 최대건조단위중량은 몰드의 외벽을 타격봉으로 두드려 다짐하는 타격봉시험으로, 최소건조단위중량은 몰드 바닥에서부터 깔때기를 대고 시료를 채우는 깔때기 채우기 시험으로 구하였다[3]. 시험에 사용한 점토와 모래 재료의 특성값을 정리하면 표 1과 같고, 두 재료의 입도분포곡선은 그림 1과 같다.

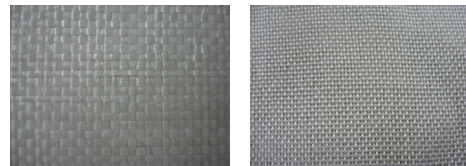
2.2.2 시험에 사용된 섬유

모래-팍-점토 복합토의 삼축압축시험에 사용될 팍재질

을 선택하기 위해 흔히 사용되고 있는 기성제품 4종류에 대하여 인장강도 및 신도시험을 실시한 후 적절한 강도를 갖는 두 개(sample #2, #3(사진 1))의 폴리프로필렌 매트(Poly Propylene mat)를 선택하였다. 선택된 섬유샘플은 시험에 적절한 크기로 재단하여 ‘Flat’봉합[4]을 하였으며 봉합부의 봉합강도시험을 실시하여 섬유의 인장강도와 봉합강도를 비교하였다. 봉합강도시험결과 봉합강도가 섬유의 인장강도보다 작은 것으로 나타나 이 연구에서는 섬유의 인장강도로 섬유의 봉합강도를 적용하였다. 선정된 섬유의 인장강도와 인장신도 및 봉합강도는 표 2와 같다. 표 2에서 T_a 는 섬유의 허용인장강도이며, 경사 및 위사방향은 섬유 직조시 제조공정상에서 결정되는 방향이다.



[그림 1] 재료의 입도분포곡선



(a) sample #2

(b) sample #3

[사진 1] 시험에 사용된 섬유

[표 1] 시험에 사용된 재료의 특성치

| | 아터버어그 한계 | | 압밀계수 c_v (cm ² /sec) | 최대 건조단위중량 γ_{dmax} (t/m ³) | 최소 건조단위중량 γ_{dmin} (t/m ³) | 전단저항각 ϕ (°) | USCS |
|----|----------|-------|--------------------------------------|---|---|---------------------|------|
| | LL(%) | PI(%) | | | | | |
| 점토 | 38.3 | 16.6 | 8.6×10^{-4} | - | - | - | CL |
| 모래 | - | - | - | 1.817 | 1.257 | 38.3 | SP |

[표 2] 사용된 팍 재료의 역학적 특성

| Type of pack material | | #1 | #2 | #3 | #4 |
|--------------------------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| 인장강도, T_a (kgf/5cm) | 경사방향 | 404.7 | 192.2 | - | - |
| | 위사방향 | 402.3 | 212.1 | - | - |
| 인장신도(%) | 경사방향 | 22.1 | 20.8 | - | - |
| | 위사방향 | 18.0 | 14.1 | - | - |
| 봉합강도(kgf/5cm) | | 245.9 (두줄박음) | 73.3 (한줄박음) | 59.3 (한줄박음) | 83.3 (두줄박음) |

3. 복합토의 삼축압축시험

3.1 시험방법

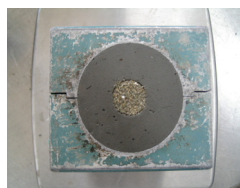
복합토(모래-점토, 모래-펍-점토)에 대하여 표준 삼축 압축시험 방법에 따라 압밀 비배수 시험(CU test)을 실시하였다. 치환율 10, 20%로 조성된 모래-점토 복합토와 두 종류의 섬유(sample #2, #3)로 조성된 치환율 10, 20%의 모래-펍-점토 복합토를 구속압력 100, 200, 300 kPa로 압밀 비배수 시험을 실시하였다. 시험순서는 다음과 같다.

3.1.1 모래-점토 복합토

- ① 균질한 시료를 얻기 위해 사용된 원심력 압밀시험기에서 압밀이 종료된 시료를 꺼내어 트리머에서 성형(지름 5cm, 길이 10cm)을 한다.
- ② 성형이 끝난 점토를 시료 성형기에 넣고 각 치환율에 맞는 케이싱을 이용하여 점토 중앙에 삽입한 후 시료의 교란을 최소화 하면서 천천히 인발한다.
- ③ 점토시료 중앙에 생긴 공동에 준비된 모래말뚝(시험의 편의를 위하여 모래말뚝은 상대밀도 70%로 다짐하여 미리 얼려서 보관, 사진 2)을 천천히 밀어 넣어 모래-점토 복합토를 조성한다(사진 3).
- ④ 시료 외부에 필터페이퍼를 부착하고 시료를 삼축실에 안치한 후 시료를 일정압력(100, 200, 300kPa)으로 등방압밀의 과정을 거쳐 비배수 상태(CU Test)에서 변위를 제어하여 0.1%/min의 전단속도로 변형률 15%까지 시험을 실시한다.



[사진 2] 얼린 모래말뚝



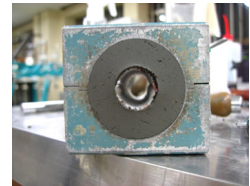
[사진 3] 복합토 조성

3.1.2 모래-펍-점토 복합토

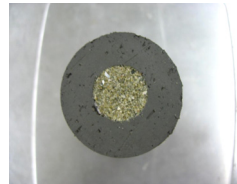
- ① 및 ②번은 모래-점토 복합토 시험순서의 ① 및 ②번과 동일
- ③ 치환율에 맞게 미리 제작된 펍을 준비한다(사진 4).
- ④ 점토시료 중앙에 생긴 공동에 준비된 펍을 넣어 점토벽면에 밀착시킨다(사진 5).
- ⑤ 펍 내부에 모래를 다지면서 펍 말뚝을 조성한다(상대밀도(Dr=70%)(사진 6).
- ⑥ 모래-점토 복합토 시험순서의 ④번과 동일



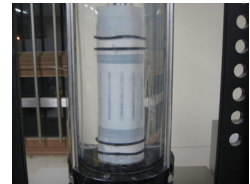
[사진 4] 재단된 펍 준비



[사진 5] 시료에 펍 삽입



[사진 6] 펍 말뚝 조성



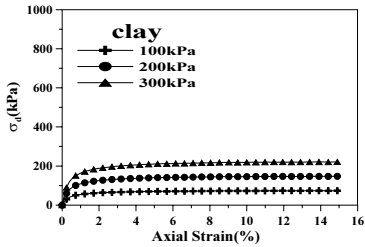
[사진 7] 시험 중 복합토

3.2 시험결과 및 분석

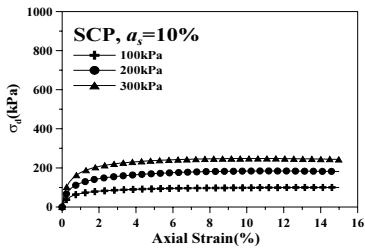
3.2.1 응력-변형률 관계

점토와 치환율 각각 10% 및 20%로 조성된 모래-점토 복합토 및 모래-펍-점토 복합토에 대한 삼축압축시험 결과로부터 얻은 응력-변형률 관계를 나타내면 그림 3~그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모래-점토 복합토가 변형률 13% 부근에서 파괴되는 것과는 달리 모래말뚝을 펍으로 보강했을 때는 변형률의 증가에 따라 압축응력이 계속 증가하는 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 모래-펍-점토 복합토의 치환율 10%의 경우 변형률 15% 부근에서 시료의 좌굴로 인한 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 치환율 20%의 경우 펍 #2, #3 모두 변형률이 15% 이상 발생하여도 시료는 파괴에 이르지 않고 거의 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 펍의 인장강도가 펍의 파괴 전까지는 모래-펍-점토 복합토의 거동에 큰 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 판단된다. 모래-펍-점토 복합토는 모래-점토 복합토에 비해 치환율 10%의 경우 약 2배, 20%의 경우 약 3배가량 압축응력이 큰 것으로 확인되어(변형률 15% 기준) 펍 말뚝공법은 SCP공법에 비해 지지력 측면에서 좋은 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 치환율 10%의 경우 펍의 인장강도가 다르더라도 두 시료가 거의 같은 값을 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 펍 말뚝이 좌굴파괴되어 펍의 인장강도가 발휘되지 못했기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 결과는 펍 말뚝의 경우 펍의 인장강도와 함께 펍의 지름/길이 비가 시료의 파괴와 밀접한 관계를 갖는다는 것을 의미하며 이는 모래-펍-점토 복합토가 모래-점토 복합토의 벌징(bulging)파괴와 달리 좌굴 파괴되기 때문인 것으로 판단된다(그림 6 참조). 따라서 펍 말뚝의 경우 치환율과 함께 D/L 비의 결정이

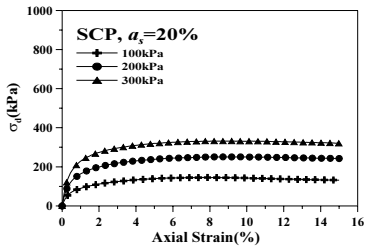
지반의 지지력, 침하 등 전체적인 지반거동에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.



[그림 3] 점토의 응력-변형률 관계

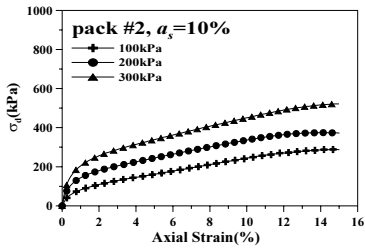


(a) 치환율 10%

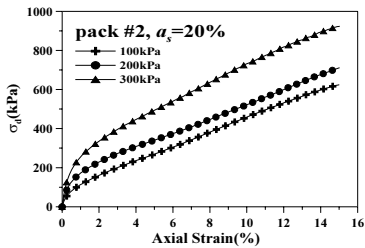


(b) 치환율 20%

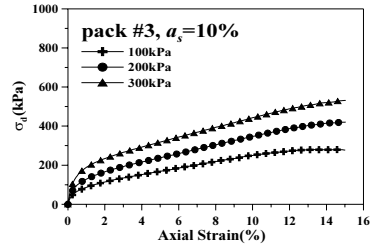
[그림 4] 모래-점토 복합토의 응력-변형률 관계



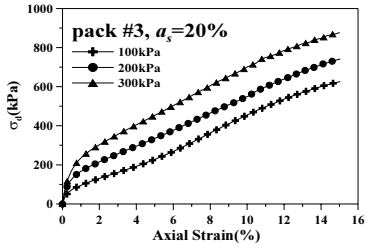
(a) 치환율10%(Pack #2)



(b) 치환율 20%(Pack #2)

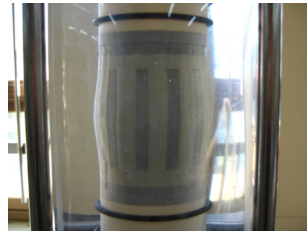


(c) 치환율 10%(Pack #3)

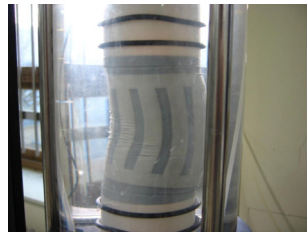


(d) 치환율 20%(Pack #3)

[그림 5] 모래-팍-점토 복합토의 응력-변형률 관계



(a) 벌징(bulging)파괴(모래-점토 복합토)



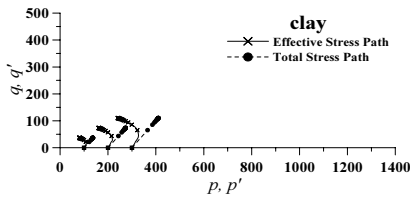
(b) 좌굴파괴(모래-팍-점토 복합토)

[그림 6] 복합토의 파괴형태

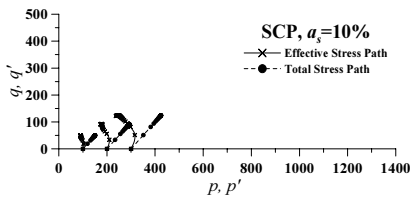
3.2.2 응력경로

모래-점토 복합토 및 모래-팍-점토 복합토에 대한 삼축압축시험시 응력경로를 나타내면 그림 7~그림 9와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 점토의 경우 전형적인 정규압밀점토의 응력경로를 나타내고 있다. 모래-점토 및 모래-팍-점토 복합토의 경우 치환율의 증가에 따라 조금 더 과압밀점토의 응력경로에 가까운 형태를 갖는 것을 확인할 수 있었으며 같은 치환율에서는 구속압력이 작을수록 과압밀점토의 경향을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

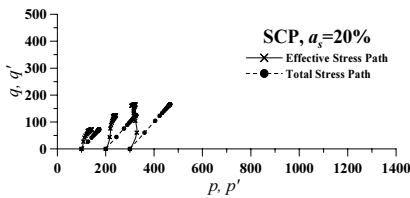
하지만 모래-점토와 모래-팩-점토 복합토의 응력경로가 과압밀점토의 경향을 갖는 것은 서로 다른 요인에 의해 의한 것이라고 볼 수 있는데 모래-점토 복합토의 경우 치환율의 증가에 따라 모래의 다일러턴시 현상에 의해 과잉간극수압이 감소하여 과압밀점토에 가까운 경향을 나타내는 반면 모래-팩-점토 복합토의 경우 치환율이 증가 하더라도 과잉간극수압은 거의 일정하였으며 치환율의 증가에 따른 축차응력 증가양상의 변화에 의해 응력경로가 변화되어 과압밀점토의 경향을 나타내는 것으로 판단되었다.



[그림 7] 점토의 응력경로

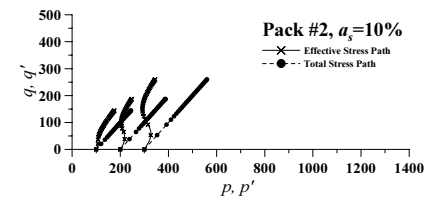


(a) 치환율 10%

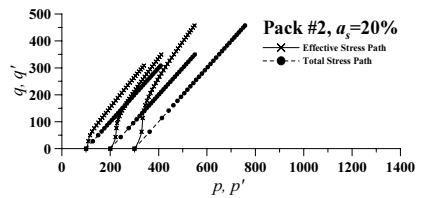


(b) 치환율 20%

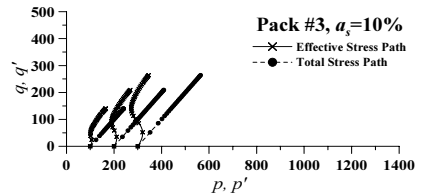
[그림 8] 모래-점토 복합토의 응력경로



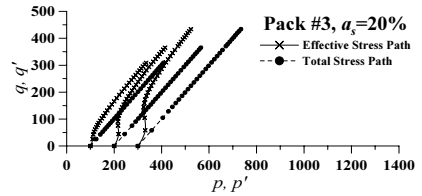
(a) 치환율10%(Pack #2)



(b) 치환율 20%(Pack #2)



(c) 치환율 10%(Pack #3)



(d) 치환율 20%(Pack #3)

[그림 9] 모래-팩-점토 복합토의 응력경로

3.2.4 강도정수

[표 3] 삼축압축시험 결과로 얻어진 강도정수

| 흙의 종류 | | CU 시험결과 | | | | |
|----------------|----------------------|---------|-----------------------|---------|------------------------|------|
| | | c(kPa) | ϕ ($^{\circ}$) | c'(kPa) | ϕ' ($^{\circ}$) | |
| 점토 | | 0 | 15.9 | 0 | 27.4 | |
| 모래-점토 | 치환율 | 10 | 8 | 16.1 | 5 | 29.5 |
| | | 20 | 23 | 18.5 | 0 | 31.5 |
| 모래-팩-점토 (팩 #2) | (a _s , %) | 10 | 55 | 21.8 | 33 | 43.0 |
| | | 20 | 145 | 25.2 | 93 | 46.3 |
| 모래-팩-점토 (팩 #3) | | 10 | 55 | 22.6 | 37 | 43.2 |
| | | 20 | 170 | 22.6 | 118 | 41.8 |

삼축압축시험의 결과로 얻어진 강도정수를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 보는 바와 같이 점토의 강도정수보다는 모래-점토 복합토의 강도정수가, 모래-점토 복합토의 강도정수보다는 모래-팩-점토 복합토의 강도정수가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 하지만 모래-팩-점토 복합토에 대한 강도정수의 경우 치환율 10%에서는 팩의 인장강도와 상관없이 거의 비슷한 값을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 치환율 20%에서는 Pack #3은 점착절편(c, c')이 Pack #2에 비해 크게 나타난 반면 전단저항각(ϕ , ϕ')은 작은 것으로 나타났다. 치환율 10%에서 팩의 인장강도와 상관없이 두 시료 모두 거의 같은 강도정수를 나타내는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 시료내 팩 말뚝의

좌굴파괴로 인해 팍의 인장강도가 거의 발휘되지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 팍 말뚝과 모래다짐말뚝의 강도 및 거동특성을 비교하기 위해 치환율 10% 및 20%로 조성된 모래-점토 복합지반 및 모래-팍-점토 복합지반의 시료에 대하여 일련의 삼축압축시험을 수행하였으며, 연구결과 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 삼축압축시험 결과, 모래-점토 복합토에 비해 모래-팍-점토 복합토의 강도가 치환율 10% 및 20% 모두에서 훨씬 크게 측정되어 팍말뚝이 모래다짐말뚝보다 큰 지지력을 갖는다는 것을 확인하였다.
- (2) 모래-팍-점토의 삼축압축시험 결과 치환율 10%에서는 팍의 인장강도와 상관없이 두 시료가 거의 같은 강도를 갖는 것으로 나타났는데 이것은 모래다짐말뚝에서는 벌징(bulging)파괴가 발생하지만 팍 말뚝에서는 좌굴파괴가 발행하기 때문으로 판단된다.
- (3) 전형적인 정규압밀점토의 응력경로를 보이는 점토 시료와는 달리 모래-점토 및 모래-팍-점토 복합토의 경우 치환율의 증가에 따라 과압밀점토의 응력 경로에 가까운 형태를 갖으며, 같은 치환율에서는 구속압력이 작을수록 과압밀점토의 경향을 갖는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] 김명모, 김병일, 이승원, 조성민, “지반개량공법 설계”, 도서출판 새론, p.201, 2004.
- [2] 김병일, 이상익, 김제규, 정용우, “SCP, GCP, MLPP 공법의 거동특성 비교”, 대한토목학회논문집, 제25권, 제4C호, pp.267-268, 2005.
- [3] 이상덕, “토질시험(원리와 방법)”, 도서출판 새론, pp.81-88, 1996.
- [4] Koerner, Robert M, “Designing with Geosynthetics”, Prentice-Hall, New Jersey, p.86, 1986.

유 완 규(Wan-Kyu Yoo)

[정회원]



- 2004년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 박사과정

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 병 일(Byoung-II Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학