

자기력이 적용된 철가루 혼합 사질토의 전단강도특성 연구

Study on Shear Strength Characteristic of Steel Particle-sand Mixture Influenced by Magnetic Force

조 중 기* · 장 병 옥**† · 김 성 필*** · 허 준***

Cho, Joong-Ki · Chang, Pyeong-Wook · Kim, Seong-Pil · Heo, Jun

Abstract

Strain-stress behavior of soil is of importance in dealing with geo-techniques which relate to bearing capacity, slope stability, earth pressure and many geo-technical problems. So understanding mechanism of the behavior and reinforcing soil to the required state has been an issue for many years. This paper presents the possibility of magnetic force in enhancing shear strength. To analyze the reinforcing effect, triaxial compression tests were performed on two sets of steel-sand mixtures, one of which is influenced by permanent magnet, NdFeB. With magnetic force under 50 kPa confining pressure, maximum shear strengths increased according to steel percentages but under 100 kPa, no significant changes in maximum shear strengths occurred. Therefore the analysis by Mohr's circles indicates that magnetic force converts the shearing characteristics of sand into those of clay.

Keywords : Steel particle - Sand mixture, Triaxial test, Magnetic force, Mohr-Coulomb failure criteria

1. 서 론

흙을 공학적 재료로 사용하려 할 때 가장 중요한 것은 재료가 가지는 안정성이라 할 수 있으며 이는 흙의 전단강도로 잘 표현될 수 있다. 전단강도는 지반의 지지력, 사면안정 및 토류구조물에 작용하는 수평토압 등과 같은 문제와 매우 밀접한 관련을 가지고 있으므로 메커니즘을 정확하게 이해하고, 알맞은 전단강도를 추정하는 것은 그만큼 중요하다고 할 수 있다. 따라서 여러 가지 조건과 다양한 흙에 대해서

전단강도에 대한 많은 실험적인 연구가 이루어지고 있으며, 특히 흙 자체가 공학적으로 요구하는 전단강도를 가지지 못할 때 이를 개선하기 위해 고려되는 혼합토에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, 기존의 연구의 대부분은 혼합재료의 고결화 특성이나, 혼합재 자체의 강도를 통하여 전단강도 증가를 모색하고 있으며, 이러한 방법들은 보강효과가 정적이고, 비가역적이라는 특징을 가진다. 이에 반하여 자기력은 전기를 통해 그 크기를 제어할 수 있으며, 시간에 따라 변화를 시킬 수 있다는 점에서 새로운 보강력으로서 가능성을 지닌다. 이에 본 연구에서는 새로운 보강재로 철가루를 적용하였으며 이를 통해 발생하는 자기력을 새로운 보강력으로 고려하였다. 이를 위하여 주문진 표준사에 다양한 중량비로 철가루를 섞은 후 영구 자석으로 자력을 가하여 두 가지 구속

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원
** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 정교수
*** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 선임연구원
† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593
Fax: +82-2-873-2087
E-mail address: pwchang@smu.ac.kr

압 조건에서 삼축압축시험을 실시하여 그 결과를 비교, 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 재료

가. 주문진 표준사 및 철가루

본 연구에서는 철가루와 혼합할 조립토로 주문진 표준사를 선택하였으며 주문진 표준사와 혼합할 재료로 취성을 가지는 주철을 분쇄한 철가루가 주재료인 분말을 사용하였다. 철가루의 경우 물과 접촉 시 산화가 촉진되어 자기력 저하 또는 환경오염을 유발할 수 있으므로 실제 현장 적용 시 코팅이나 도금을 통하여 보완이 필요할 것으로 판단된다. 두 재료에 대한 물리적 특성은 다음 표와 같다.

시험에 사용된 주문진 표준사와 철가루의 균등계수와 곡률계수에서 볼 수 있듯, 두 재료 모두 입자의 크기가 거의 균일하다 할 수 있으나 각 통과중량 백분율별 입경의 크기를 비교해 보면 철가루가 더 세립입자로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 두 재료 모두 입경의 크기에 있어서 0.074 mm 이상의 값을 가지므로 입경에 의한 흙의 분류법(ASTM)에 의하면 모래로 구분 될 수 있다. 두 재료 및 각 중량비 별 혼합재의 입도분포 곡선은 다음과 같다.

Table 1 Properties of mixture components

Material	Gravity	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c
JuMoonJin sand	2.63	0.44	0.52	0.64	1.45	0.96
steel particle	4.75	0.085	0.11	0.16	1.88	0.89

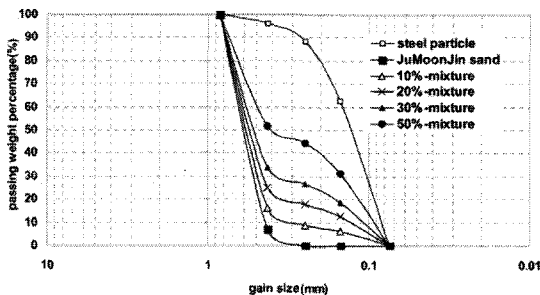


Fig. 1 Grain size distribution curves of materials and mixture

나. 자석

본 연구를 위하여 영구자석의 한 종류인 NdFeB(네오디움) 자석을 자기력원(magnetic source)으로 이용하였다. 삼축압축시험기와와의 호환성을 유지하기 위하여 NdFeB(네오디움) 자석의 지름을 50 mm(시료의 지름)로 선택하였다. 더 큰 자기력을 발생시키기 위하여 두께가 다른 두 종류의 자석을 결합하여 사용하였으며, 삼축압축시험 시 배수의 문제를 해결하기 위하여 자석의 중앙부에 지름 5 mm의 구멍을 만들었다. 이렇게 제작된 최종적인 자석의 자기력크기를 가우스미터기로 측정한 결과 중심부 자기력 약 2800G, 최외곽부 자기력은 약 3800G로 측정되었다.

2. 시험방법

가. 시료의 혼합비

자기력을 가하는 자기력원(magnetic source)으로 네오디움 영구자석을 이용하였기 때문에 자기력을 조절하기 위해서는 철가루의 혼합비를 다르게 하여 일정한 중량비로 철가루와 주문진 표준사를 임의로 혼합하였다. 철가루의 혼합비율은 주문진 표준사의 중량을 기준으로 각각 10%, 20%, 30%, 50%로 하였다.

나. 공시체의 제작

현재까지 최대, 최소건조단위중량을 결정하는 방법은 여러 가지가 제시되었으나 아직까지 표준화 된 방법은 없다. 최대건조단위중량을 결정하는 방법은 대표적으로 시료자체에 진동을 가하거나 시료가 들어있는 몰드에 진동을 가하는 방법과 일정높이에서 낙하시키는 방법이 있으나, 본 시험에서는 혼합되는 두 재료의 비중차이로 인한 분리현상 때문에 진동을 가하거나 낙하시키는 방법은 부적절하다고 판단되어 정적인 다짐을 통하여, 최대건조밀도를 결정하였다. 최대건조밀도를 결정하기 위하여 $\Phi 74.6 \times 53.6h$ (mm)의 금속 캔에 혼합시료를 1/3씩 넣으면서 위에서 상부에서 하중을 가하여 정적인 다짐으로 15회씩 압력을 가하였다. 이 때, 입자의 파쇄를 방지하기 위하여 캔 밑부분은 20 mm 스펀지로 완충하였다. 또한 이를 결정하기 위해 3회 실시 후 평균값을 적용하였다. 또한 최소건조밀도를 결정하기 위하여 최대건조밀도에서 사

용된 동일한 몰드를 이용하였으며 출구의 지름이 14.2 mm인 벨브식 깔때기를 이용하여 배출구를 시료에 접하여 빠른 속도로 투하시킨 후 중량을 측정하였다. 최대전도밀도와 마찬가지로 각 3회씩 실시하여 평균한 값을 사용하였다. 이 결과를 이용하여 각 철가루 함량별 상대밀도 75%에 해당되는 시료의 중량을 계산하였다.

조립토는 포화상태이거나 건조 상태이거나 간극수 및 공기가 자유롭게 드나들 수 있는 배수(Drained) 상태에서는 유사한 응력-변형률의 거동을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 철가루 입자와 물의 화학적 변화로 인한 산화에 의한 자기력의 변화를 배제하기 위하여 시료는 건조상태 그대로 몰드에 주입하였으며 상대밀도가 75%가 되도록 미리 계산된 중량을 1/4씩 주입하며 다짐하여 공시체를 성형하였다. 시료의 모양은 자석의 직경을 고려하여 직경 50 mm, 높이 100 mm의 원통형으로 하였으며, 철가루-주문진 표준사 혼합공시체를 만들어 자력을 가할 때 자력이 하부에 가해지기 때문에 삼축압축시험기의 하부 pedestal에 접하는 부분이 위로 오도록 뒤집어서 성형을 해야 한다. 만약 미리 자력을 가한 상태에서 혼합시료를 투하할 경우 철가루는 자석의 자기장내의 자기력선을 따라 배열되어 모래와 분리되기 때문에 균일한 공시체를 얻을 수 없다. 또한 시료가 조립토인 경우 시료 자체로 자립이 힘들고 약간의 진동이나 충격에도 쉽게 허물어지므로 split몰드를 사용하여 조심스럽게 성형을 해야 한다. 이와 같은 과정으로 제작된 공시체의 초기조건은 다음 표와 같다.

Table 2 Initial parameters for steel-sand mixtures

No.	Mixing ratio steel : sand (by weight, %)	Confining pressure(kPa)	Dry unit weight (gf/cm^3)	Relative density(%)
1	0:100	50	1.49	75
2	0:100	100	1.49	75
3	10:90	50	1.54	75
4	10:90	100	1.54	75
5	20:80	50	1.6	75
6	20:80	100	1.6	75
7	30:70	50	1.65	75
8	30:70	100	1.65	75
9	50:50	50	1.76	75
10	50:50	100	1.76	75

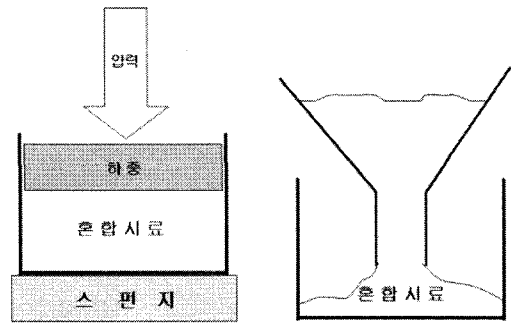


Fig. 2 Determination of y_{dmax} and y_{dmin}

다. 삼축압축시험

본 연구에서는 혼합시료에 대하여 압밀배수(CD)조건으로 삼축압축시험을 실시하였다. 성형된 공시체는 수압을 이용한 구속압으로 부피의 변화가 일어나지 않을 때까지 압밀을 실시하였다. 또한 전단 시에는 수직변형률 0.167%/min로 하여 응력제어율방식으로 시험을 실시하였으며, 각각의 철가루 함량에 대해서 50 kPa, 100 kPa의 두 가지 구속압 조건으로 시험을 실시하였다. 또한 자기력의 영향을 비교하기 위하여 자기력을 가하지 않은 혼합시료에 대해서도 같은 조건으로 시험을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 최대전단응력

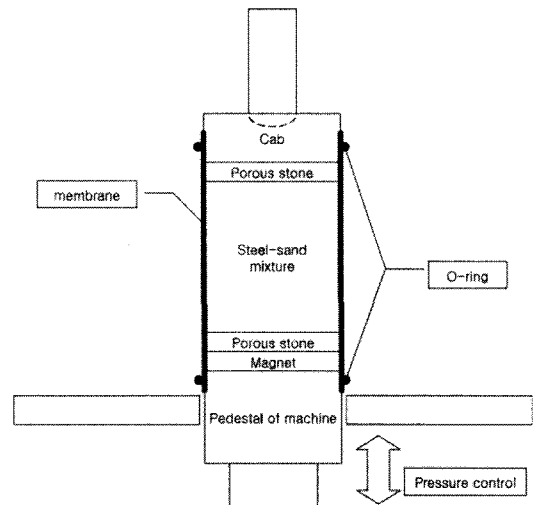


Fig. 3 schema of triaxial test for steel-sand mixture

가. 구속압 50 kPa

자기력을 가하지 않은 상태의 50 kPa의 구속압 하에서 주문진 표준사의 최대 전단강도는 146.9 kPa의 값을 나타냈으며, 철가루 함량이 증가함에 따라 10%, 20%, 30%, 50%의 순서대로 156.6 kPa, 174.8 kPa, 181.4 kPa, 234 kPa처럼 증가하는 값을 나타냈다. 이는 철가루 함량이 높아질수록 미세분이 많아져 입도분포가 좋아지고, 초기간극비가 더 작아지면서 입자간의 역물림 상태가 양호해지기 때문인 것으로 추정된다. 또한 50 kPa의 구속압 하에서 자기력을 가한 철가루-주문진표준사에 대해서 최대 전단강도는 철가루 함량 10%, 20%, 30%, 50%의 순서대로 160.7 kPa, 194 kPa, 216.6 kPa, 312.4 kPa의 증가하는 값을 나타냈으며, 자기력을 가하지 않은 조건에서 같은 철가루 성분비의 시료에 비교한 결과 자기력이 가

해진 상태의 시료가 그렇지 않은 시료에 비하여 각각 4.7 kPa, 19.2 kPa, 35.2 kPa, 78.4 kPa씩 증가하는 값을 나타내었다. 따라서 50 kPa 구속압 조건에서는 자기력에 의해서 최대 전단응력이 증가한다는 것을 알 수 있다.

나. 구속압 100 kPa

자기력을 가하지 않은 상태의 100kPa의 구속압 하에서도 50kPa 구속압 조건과 같이 철가루함량이 높아질수록 입도분포가 좋아지면서 최대 전단강도가 증가하는 것으로 나타났다. 철가루를 혼합하지 않은 순수한 주문진 표준사의 최대 전단강도는 317.7 kPa을 나타내었으며, 10%, 20%, 30%, 50% 혼합시료의 순서대로 335 kPa, 341.6 kPa, 352.5 kPa, 460.8 kPa 값을 나타냈다. 하지만, 자기력을 가한 철가루-

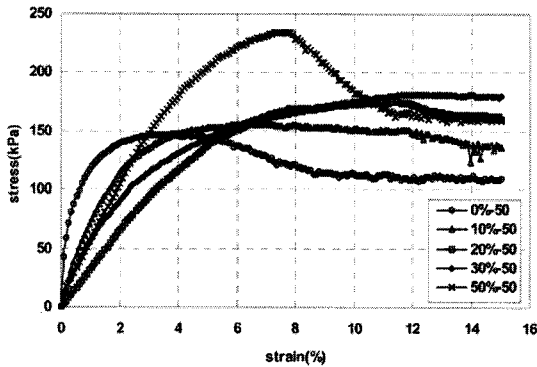


Fig. 4 Stress-strain behaviors of various mixtures without magnetic force(50 kPa)

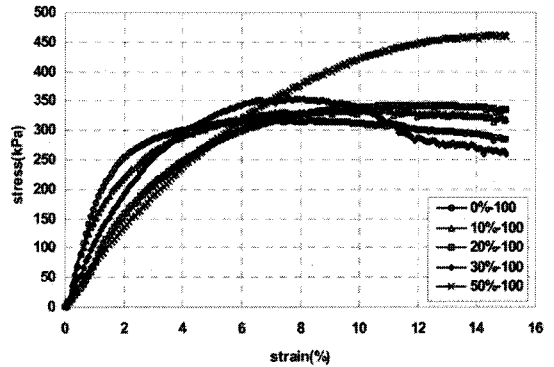


Fig. 6 Stress-strain behaviors of various mixtures without magnetic force(100 kPa)

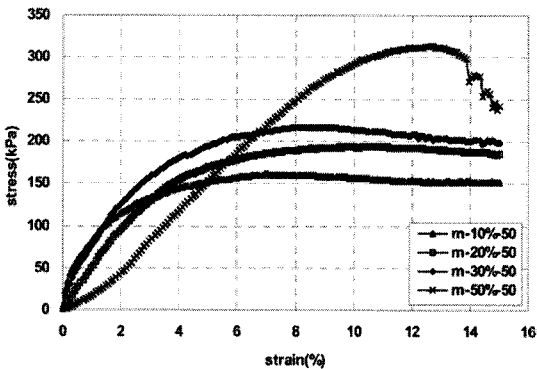


Fig. 5 Stress-strain behaviors of various mixtures with magnetic force(50 kPa)

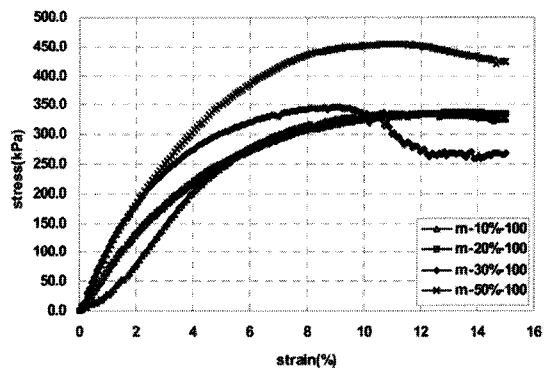


Fig. 7 Stress-strain behaviors of various mixtures with magnetic force(100 kPa)

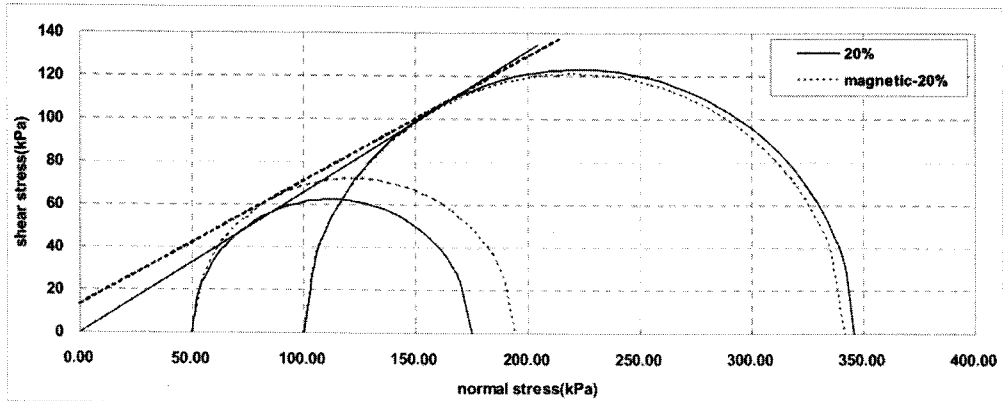


Fig. 8 Mohr's circles for 20% steel-sand mixtures

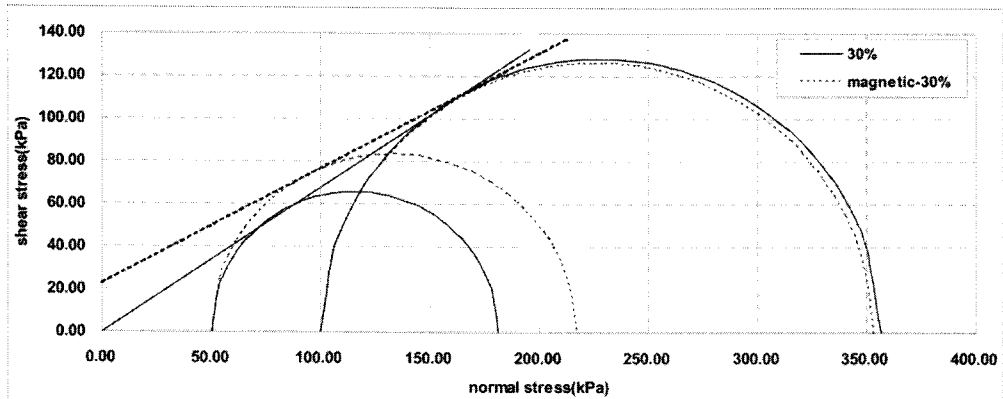


Fig. 9 Mohr's circles for 30% steel-sand mixtures

주문진표준사의 최대 전단강도는 자기력을 가지지 않은 조건에 비교하였을 때, 10% 철가루 함량의 혼합시료에 대해서만 1.4 kPa의 값이 증가하고 20%, 30%, 50% 철가루 함량의 혼합시료에 대해서는 각각 338 kPa, 346.4 kPa, 354.5 kPa의 값을 나타내며, 3.6 kPa, 6.1 kPa, 6.3 kPa, 씩 감소하였다. 이는 공시체의 측면에 작용하는 구속압이 커지면서, 자기장으로 인하여 철가루에 작용하는 인력 중에서 수직력이 축력에 기여하기 때문인 것으로 추측된다.

2. 강도정수의 비교

각 시험결과를 이용하여 모어원을 작도하고 p-q 관계를 이용하여 강도정수를 구한 후, 그 값을 비교하여 본 결과, 10%의 혼합시료에 대해서는 자기력의 유무에 따른 내부마찰각의 값이 31.9°에서 30.4°로 약

간 감소하는 변화를 보였으나, 큰 차이를 나타내지 않았다. 반면, 20%, 30%, 50%의 혼합시료에 대해서는 자기력이 작용한 시료에 대해서는 각각 13.5 kPa, 26.9 kPa, 50.5 kPa의 점착력이 발생하였으며, 내부마찰각의 값은 각각 28.8°, 26.4°, 28.7°로 그 값이 자기력

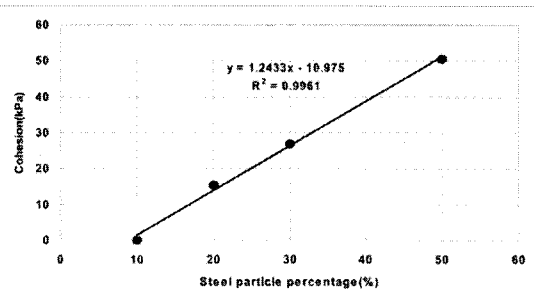


Fig. 10 Relation between cohesion and steel particle percentage

이 작용하지 않은 시료에 비하여 각각 4.6°, 7.9°, 11.5°씩 감소하였다. 따라서 자기력이 작용했을 경우, 철가루 함량에 비례하여 점착력의 값이 증가하는 경향을 보이며, 이는 자기력과 점착력이 비례관계에 있음을 보여준다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 자기력이 사질토의 응력-변형률 거동에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 철가루와 주문진 표준사를 일정한 중량비로 혼합시킨 혼합시료에 대해서 철가루 함량비를 달리한 후, 2800~3800G의 네오디움 영구자석을 이용하여 자기력을 변수로 설정한 조건으로 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험은 50 kPa, 100 kPa 두 가지 구속압에 대하여 암말배수(CD) 모드로 진행되었으며 0.167%/min의 속도의 응력제어방식으로 총 변형률 15%에서 파괴를 종료시켰다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자기력이 작용하지 않은 혼합시료에 대하여 철 함량이 증가할수록 최대전단응력은 증가하며 이는 주문진표준사에 비하여 철가루의 입경이 작기 때문에 더 높은 철가루 함량을 가질수록 입도분포가 좋아지고, 간극비가 작아져 마찰면적이 늘고, 입자간의 맞물림이 용이하기 때문인 것으로 추정된다.

2. 구속압 50 kPa의 조건에서는 자기력이 작용했을 때, 더 큰 최대전단응력 값을 가졌다. 즉, 50 kPa의 구속압에서는 2800~3800G의 자기력은 보강효과를 가진다고 할 수 있다.

3. 구속압 100kPa의 조건에서는 자기력이 작용했을 때와 작용하지 않았을 때의 최대전단응력 값이 크게 차이가 없었으며 2800~3800G의 자기력에서는 보강효과가 나타나지 않았다. 이는 각 철가루에 작용하는, 자기장에 의한 인력의 수직성분이 축력에 기여하기 때문인 것으로 추측된다.

4. 자기력이 작용한 경우, 그렇지 않은 경우에 비하여 모든 시료에 대한 절대적인 내부마찰각의 값이 감소하였으나, 점착력은 철함량에 비례하여 증가하였다. 즉, 자기력은 점착력과 비례한다고 할 수 있으며, 자

기력에 의해서 사질토가 점성토처럼 거동하는 것을 알 수 있다.

References

1. 권오균, 1986, 상대밀도 산정에 관한 실험적 연구, 서울대학교 석사학위논문, pp.4-9.
2. 박래영, 1989, 삼축압축시험에 의한 한강 모래의 특성연구, 한국 과학기술원 석사학위논문, pp.3-19.
3. D Kolymbas, 1990, Recent Results of Triaxial Tests with Granular materials, Powder Technology, 60, pp.99-119.
4. 이종진, 1991, 간편법에 의한 상대밀도연구, 서울대학교 석사학위논문, pp.2-6.
5. 조계춘, 2003, 표준삼축시험으로부터 사질토에서의 한계상태 정수 결정에 관한 연구(I) : 고찰 및 적용, 한국지반공학회 논문집, 19, pp.61-75.
6. 조계춘, 2003, 표준삼축시험으로부터 사질토에서의 한계상태 정수 결정에 관한 연구(II) : 실험 및 추천, 한국지반공학회 논문집, 19, pp.77-92.
7. 윤여원 등, 2004, 지반보강재로서 페타이어의 활용; (1) 지반보강효과, 한국지반공학회논문집, 20, pp.107-117.
8. 이우진 등, 2006, 고결에 따른 모래의 비배수 전단 거동 변화, 한국지반공학회 논문집, 22, pp.85-94.
9. Radoslaw L. Michalowski, 2003, Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, pp.125-136.
10. Sompote Youwai, 2004, Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire hips-sand mixtures as backfill material, Computers and geotechnics, 31, pp.103-114.
11. M. X. Zhang, 2006, Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions, Geotextiles and Geomembranes, 24, pp. 201-209.