

상태정수에 따른 자갈질 흙의 정적거동

Static Behavior of Gravelly Soil with State Parameter

허승범[†] · 윤여원¹⁾ · 김우순²⁾ · 김재윤³⁾

Heo, Seungbeom · Yoon, Yeowon · Kim, Woosoon · Kim, Jaeyoun

ABSTRACT : Recent researches on the behavior of gravelly soils have been focused mainly on the relative density or on the gravel content. And some researchers presented the liquefaction behavior based on the relative density whereas others based on the gravel content of gravelly soil. However the relative densities vary with gravel content and relative density is not enough to fully express the behavior of gravelly soils. Therefore in this research state parameter which considers void ratio and effective confining pressure is introduced and Steady State Line(SSL) of gravelly soils for various gravel content are determined by undrained triaxial tests in order to express the behavior of gravelly soils. From the research the position of SSL moved downward with gravel content. And the same density of soil showed dense sand behavior or loose sand behavior depending upon the confining pressure. Especially relative density 80% of gravelly soil showed loose sand behavior under high confining pressure. However the gravelly soils with similar state parameters showed similar stress behaviors. It can be seen that state parameter is useful tool to evaluate undrained behavior of gravelly soils. Also state parameter and undrained strength showed good correlations.

Keywords : Gravelly soil, Steady state line, State parameter, Undrained strength

요 지 : 최근의 자갈질 지반에 대한 연구는 주로 상대밀도 혹은 자갈함유량에 바탕을 둔 연구로써 자갈질 지반의 액상화거동에 대하여 일부 연구자들은 상대밀도, 다른 연구자들은 자갈함유량에 상관성을 가지고 있음을 발표하였다. 그러나 자갈질 지반의 상대밀도는 자갈함유량에 따라 달라지게 되며 상대밀도만으로 자갈질 흙의 거동을 충분히 표현하기에는 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 밀도와 구속압을 동시에 고려할 수 있는 상태정수를 도입하고 비배수 삼축압축시험을 통하여 자갈혼합물에 따른 정상상태선(Steady State Line, SSL)을 결정하고 상태정수에 따른 비배수 응력 거동을 고찰하였다. 연구 결과 정상상태선의 위치는 간극비에 의존하여 자갈 함유율이 증가할수록 상대적으로 아래쪽에 위치한다는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 상대밀도라 할지라도 구속압에 따라 조밀하거나 혹은 느슨한 거동을 보였다. 특히 상대밀도가 80% 이상인 조밀한 시료일지라도 큰 구속압 아래에선 느슨한 거동을 하였다. 그러나 유사한 상태정수를 갖는 자갈질 흙은 비슷한 응력거동을 나타내었다. 이로써 흙의 거동은 상대밀도보다 상태정수에 근거해야 함을 알 수 있었다. 또한 상태정수와 비배수전단강도는 좋은 상관 관계를 나타내었다.

주요어 : 자갈질 지반, 정상상태선, 상태정수, 비배수 강도

1. 서 론

지난 20여 년 동안 사질토에 대한 동적 거동에 대한 연구는 수없이 많이 수행되었다. 그러나 자갈-모래 혼합토의 동적 거동에 대한 관심은 거의 없었으며 이에 대한 연구는 1999년의 대만의 Chi-Chi 지진 이후에 증가하고 있다(Ueng 등, 2002). 자갈-모래 혼합토에 대한 연구결과는 연구자들간에 서로 다르게 나타나고 있다. 동일 상대밀도의 자갈-모래 혼합토에서도 자갈혼합률에 따라 서로 다른 거동을 나타내는 이유는 최대 및 최소 밀도가 다르기 때문이다(Evans 등, 1994). 따라서 혼합토의 상대밀도만으로 동적거동, 비배수 거동을 표현하기에는 충분하지 않다. 이는 조밀한 모래도

높은 구속압력에서 체적감소 거동을 보이는 것과 유사한 현상이다. 따라서 간극비와 응력을 같이 고려한 상태정수(state parameter)를 도입하여 자갈-모래 혼합토를 대상으로 자갈혼합률을 변화시켜가며 혼합토에 대한 거동을 연구하고자 한다. 연구를 위해서 자갈혼합률을 달리한 등방압밀 포화시료에 대한 정적 삼축압축시험을 통하여 상태정수를 구하고 상태정수에 따른 거동을 분석한다. 분석결과는 장차 수행되는 동적삼축시험 결과와 비교하여 상태정수에 의한 동적 거동을 평가하고, 아울러 지진동을 삼축압축시험보다 근사하게 모사한 시험장비인 단순전단시험기를 이용하여 Ko 압밀시료에 대한 정적 및 동적 시험을 수행하고 이를 상태정수와 관련지어 거동을 연구하는데 활용하고자 한다.

† 정회원, 인하대학교 공학대학원(E-mail : sbhur01@naver.com)

1) 정회원, 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수

2) 비회원, 인하대학교 공학대학원, (주)대우건설

3) 비회원, 인하대학교 공학대학원

입자크기가 다른 자갈-모래 혼합토에 대한 기존의 상대 밀도 혹은 간극비에 의존한 액상화 강도에 관한 연구는 연구자에 따라 서로 상이한 결과를 보인 사례가 있었다(Siddiqi, 1984; Wang, 1984; Haga, 1984). 이런 현상은 모래 혹은 자갈-모래 혼합토의 거동 평가에 있어 밀도뿐만이 아니라 응력 상태를 포함한 정수가 필요함을 의미한다. 본 연구에서는 Been과 Jefferies(1985)가 제안한 정상상태정수를 도입하여 자갈-모래 혼합토의 응력거동을 고찰하고자 한다. 이에 등방압밀 상태에서 자갈-모래 혼합토에 대한 삼축압축시험을 수행하여 자갈혼합을 별로 정상상태선(Steady State Line, SSL)을 도시하고, 상대밀도와 구속압을 조절하여 상대밀도 혹은 간극비가 같다 할지라도 상태정수가 양인 경우와 음인 경우로 조건을 주어 각각의 응력 거동을 분석하고자 한다. 또한 정상상태정수와 q_{max} 와의 관계를 확인하여 상태정수와 구속압에 대한 비배수 전단강도의 관계를 고찰하고자 한다.

2. 정상상태와 자갈-모래 혼합토

2.1 정상상태변형

Castro(1975)는 등방압밀공시체에 대한 정적 및 반복 삼축압축시험과 이방압밀공시체에 대한 정적 삼축압축시험을 서로 다른 상대밀도를 갖는 모래 공시체에 대해서 시행하였다. 그림 1은 단일 하중 시험결과로서 A곡선과 같이 대단히 느슨한 공시체는 비배수 상태에서 과잉간극수압이 크게 증가하고 작은 전단 변형에서 침두강도를 나타내었다가 곧바로 붕괴되어 유효구속응력이 낮은 큰 변형으로 급히 유동되고 강도도 낮아진다. 이런 형태의 거동을 당시에는 액상화라고 표현했으나 지금은 유동액상화라고 한다. 그리고 B곡선과 같은 조밀한 공시체는 수축하나 비교적 높은 일정한 유효구속응력에 이를 때까지 팽창하여 큰 변형율에서 높은

강도를 가지게 된다. C곡선과 같은 중간정도의 밀도를 갖는 공시체는 낮은 변형율에서 침두강도를 보이다가 어느 한도까지는 변형율 연화(strain softening)거동을 보인 후 다시 팽창하게 된다. 이후 계속되는 하중에 의해 팽창이 계속되고 유효구속응력이 증가되어 큰 변형에서는 강도가 크게 증가된다. 이러한 거동을 제한적 액상화(limited liquefaction)라고 불렀다. 상기 실험결과 큰 변형율에서 간극비와 유효구속응력사이에는 유일한 관계가 있음을 알았다.

즉, 이 관계곡선은 유동구조의 발달로 인해 배수시험으로부터 구한 한계간극비선(Critical Void Ratio, CVR)보다 아래에 있으며 이 곡선과 거의 나란하다. 즉 일정한 유효구속응력과 일정한 전단응력 하에서 일정한 체적과 일정한 속도로 계속해서 일어나는 유동변형을 정상상태변형(steady state of deformation)이라고 정의하였다(Castro 등, 1977). 이 정상상태변형은 흙 구조, 응력, 응력이력 및 재하조건과 같은 초기상태가 모두 소멸된 이후 대단히 큰 변형율에서만 일어나게 되므로 정상상태변형에서 지반 내의 한 지점에 대한 유효구속응력은 단지 흙의 밀도에 의해서만 결정된다. 간극비와 정상상태변형에서의 유효구속응력과의 관계곡선을 정상상태선(SSL)이라고 한다. 정상상태변형에서의 전단 저항은 유효구속응력과 비례하므로 구속응력 대신 정상상태전단강도(S_{ss})로써 나타낼 수 있으며 대수눈금으로 표시한 SSL은 흙이 유동액상화의 가능성이 있는지를 판별하는데 유용하다. 즉, 흙이 SSL 하부에 있으면 유동액상화는 일어나지 않는다. 그러나 상부에 있는 경우라도 정적 전단응력이 정상상태 강도보다 클 때만 유동액상화의 발생이 가능하다.

또한 SSL을 이용하여 액상화토의 전단강도 즉 정상상태 강도를 평가할 수 있으므로 여러 가지의 가능한 액상화의 영향을 평가하는데 유용하다. 한편 Cyclic Mobility는 SSL의 상부 또는 하부에 있는 모든 흙에서 일어날 수 있다. 즉,

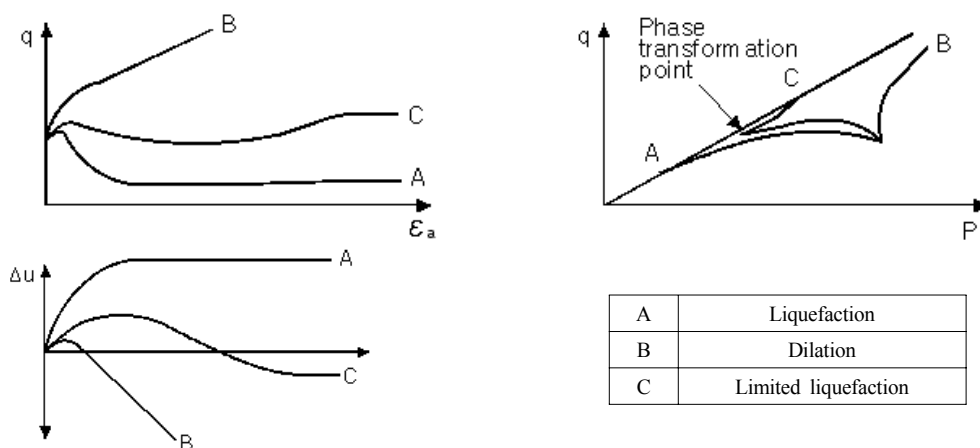


그림 1. 단순재하에서 거동 유형(Castro, 1975)

Cyclic Mobility는 느슨한 흙이나 조밀한 상태에 있는 흙에서 모두 일어날 수 있다. SSL의 위치는 구성 흙의 성질에 따라 예민하게 달라지는데 연직방향의 위치는 토립자의 입도에 그리고 기울기는 토립자의 모난 정도(angularity)에 의해서 크게 좌우된다. 즉 토립자가 둥글면 경사가 보통 완만하고 모나면 급하다.

2.2 상태정수

지반 내의 한 지점에서의 유동액상화의 발생 여부는 간극비만으로는 판단할 수 없다. 즉 어떤 일정한 간극비 일지라도 높은 유효구속응력 상태에서는 유동액상화의 발생이 가능하나 유효구속응력이 낮을 경우에는 일어나지 않는다. 즉 어떤 지반 혹은 공시체의 간극비가 같다 할지라도 유효구속응력이 다르다면 파괴 거동이 다르다는 것이다.

그림 2에서와 같이 초기 간극비가 동일한 유효구속응력 하에서 SSL로부터 떨어진 거리, 즉 정상상태 간극비 e_{ss} 와의 차이를 상태정수(state parameter)라고 정의한다(Been 등, 1985). 즉 상태정수 $\psi = e - e_{ss}$ 로 나타내고 상태정수 ψ 가 0보다 크면 흙은 수축거동을 나타내어 유동액상화의 발생이 가능하고 0보다 작으면 반대로 팽창 거동을 나타내어 유동액상화는 일어나지 않는다. 이 상태정수는 내부마찰각, CPT(Cone Penetration Test) 저항치, PMT(PressureMeter

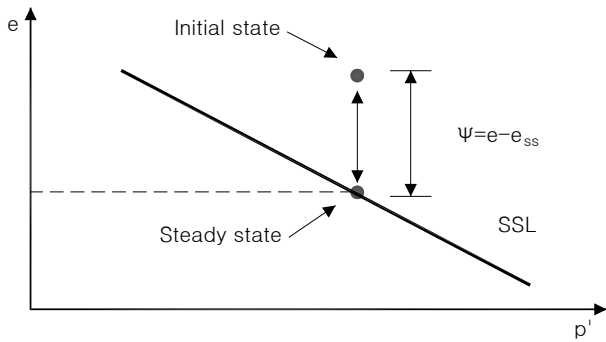


그림 2. 상태정수(state parameter) ψ

Test) 결과 및 DMT(DilatoMeter Test) 결과 등과 상관시킬 수 있다.

2.3 상태정수와 응력거동

일반적으로 느슨한 모래와 조밀한 모래에 대한 비배수시험(CU test)에서 변형율-축차응력, 변형율-간극비의 관계는 그림 3과 같다. 즉 구속압에 대한 고려 없이 상대밀도가 낮으면 느슨한 모래의 거동을 보이고, 상대밀도가 높으면 조밀한 모래의 거동을 보인다. 그렇지만 높은 상대밀도의 경우라도 구속압이 아주 크게 되어 상태정수가 양의 값을 가지는 경우에는 느슨한 모래의 거동을 보이므로 사질토의 응력 및 간극수압 거동을 상대밀도만으로는 상세히 표현할 수 없게 되며, 간극비와 구속압을 동시에 고려해야만 정확한 거동을 표현할 수 있다.

같은 상대밀도를 갖는 시료의 경우 그림 4의 경우와 같이 응력 거동의 결과 한 점(steady state point)으로 수렴하게 되어 있다. 특히 높은 상대밀도의 경우 중 A, B는 낮은 구속압에서 공시체를 파괴한 경우의 응력경로이다. 이와 같은 경우 축차응력이 침투값을 보인 후 그 값이 줄어들어 수렴하여 정상상태에 이르게 된다. 하지만 같은 상대밀도라 할지라도 높은 구속압에서 시료를 파괴하게 되면

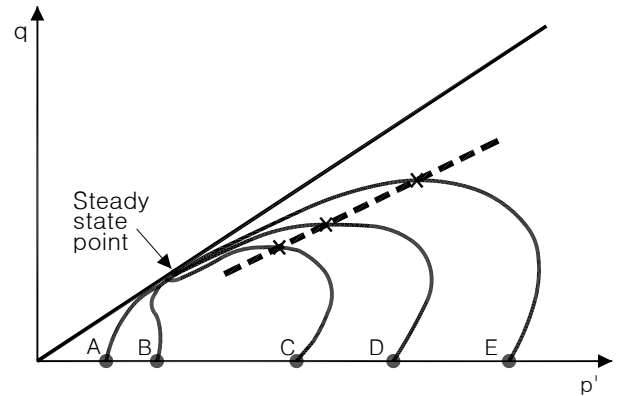


그림 4. 일정 상대밀도에서 비배수 재하 시 응력경로(Kramer, 1996)

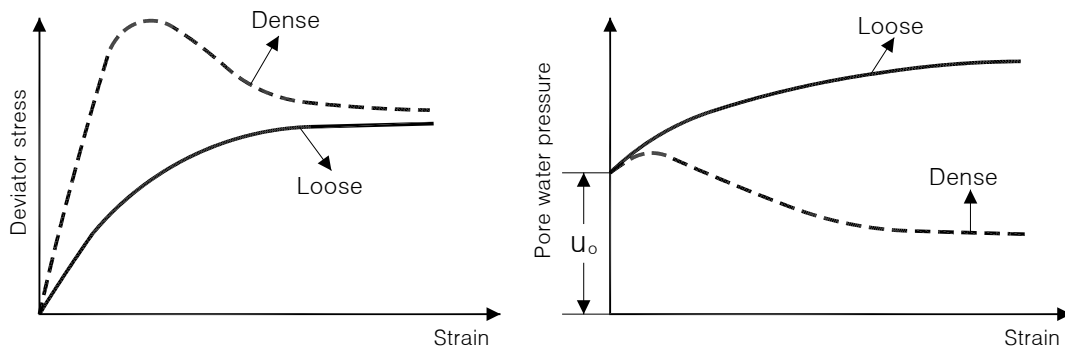


그림 3. CU 시험에서의 축차응력과 간극수압 거동

C, D, E의 경우와 같이 구속압에 의해 다일러턴시 현상이 일어나지 않아 느슨한 거동을 보이며 정상상태에 수렴하게 된다.

2.4 자갈모래 혼합토의 공학적 특성

Wang(1984)과 Haga(1984)에 의하면 모래-자갈 혼합시료의 액상화 저항은 자갈 혼합량에 따라 증가된다. 이들은 일정한 상대밀도 하에서 자갈 혼합량에 따른 반복응력비-반복횟수, 간극수압비-반복횟수, 축변형-반복횟수, 그리고 반복축차응력-체적변형률과의 관계에 대해서 반복삼축압축시험을 통하여 공학적 특성을 규명하였다.

반복삼축시험에 의한 비배수강도는 입자의 균등계수에 크게 의존하지 않으며 양진폭 변형을 5%에 대한 강도는 입도분포가 나쁜 모래와 입도분포가 좋은 자갈 간에 거의 일치하며 상대밀도에 의해서 거의 결정된다. 그러나 5%보다 큰 변형에 대한 비배수강도는 입자의 균등계수에 크게 의존하며 입도분포가 좋지 않은 모래보다 입도분포가 좋은 자갈이 훨씬 더 의존도가 높다. 입도분포가 좋은 자갈질 입자라 하더라도 화강풍화토와 같이 잘 파쇄 된다면, 비배수 정적강도는 현저하게 작으며 입도분포가 나쁜 모래와 거의 같거나 낮게 나타난다(Kokusho 등, 2004). Kokusho 등은 자갈질 흙이나 모래질 흙에서 조립자의 간극을 채우는 세립자의 최대혼합량을 한계 세립질혼합량이라고 하였으며, 한계 세립질혼합량까지는 혼합량 증가에 따라 비배수강도는 감소한다고 하였다. 또한 그는 자갈질 흙에서 한계 세립질혼합량

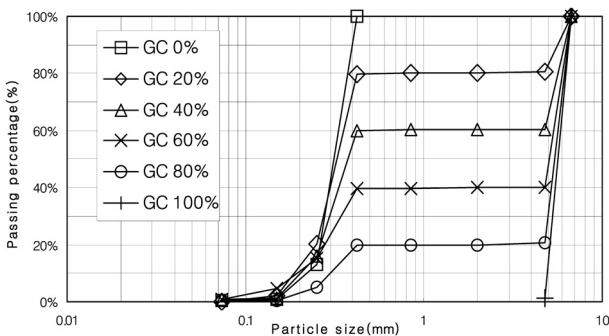


그림 5. 자갈질 혼합토의 입도분포곡선

표 1. 자갈질 혼합토의 물리적 특성

Gravel contents, GC(%)	0	20	40	60
Coefficient of uniformity, C_u	1.40	1.50	1.90	27.3
Coefficient of curvature, C_z	1.00	1.11	0.93	9.40
Dry unit weight, $\gamma_d(\max), \gamma_d(\min)(t/m^3)$	1.61, 1.36	1.73, 1.48	1.85, 1.62	1.96, 1.73
Void ratio, e_{\max}, e_{\min}	0.94, 0.64	0.78, 0.53	0.63, 0.42	0.52, 0.34
Specific gravity, G_s	2.64	2.64	2.64	2.64
USCS	SP	SP	SP	GP

은 10~20%이며, 모래질 흙에서는 한계 세립질혼합량이 30~40%정도라고 하였다.

Evans와 Rollins(1994)는 상대밀도 40%인 자갈-모래 혼합시료에 대한 반복 삼축압축시험으로부터 혼합토의 액상화강도는 자갈혼합율이 증가함에 따라 증가함을 알았으며 느슨한 모래의 거동을 나타내었다. 김방식 등(2005a, 2005b, 2007)은 자갈-모래 혼합토의 혼합을 변화, 상대밀도, 응력조건의 변화에 대한 연구 결과로부터 자갈-모래 혼합토의 액상화 강도는 자갈 혹은 모래의 혼합율에 따라 결정되지 않고 혼합토 전체의 복합적인 요소에 의해 결정된다고 밝히고 있다. 따라서 이들의 연구결과로부터 자갈-모래 혼합토의 동적거동이 단순히 상대밀도 혹은 혼합율 등의 한 가지 변수에 의해서 결정되지 않음을 알 수 있다.

3. 시험 방법

3.1 시료

본 연구에 사용된 모래는 #40 체를 100% 통과하고 #200 체에 100% 잔류하는 시료를 사용하였다. 자갈은 6.7mm 체를 모두 통과하고 #4 체에 100% 잔류하는 시료이다.

자갈혼합율 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%인 자갈-모래 혼합토 시료의 입도분포곡선을 그림 5에 나타내었으며 이들의 물리적 성질은 표 1과 같다.

시료의 최소 건조단위중량은 자갈과 모래가 혼합된 시료를 지름이 12mm인 깔대기에 넣고 몰드 속에서 낙하거리를 최소로 하여 자유 낙하시켜 구하고, 최대 건조단위중량은 몰두에 자갈과 모래가 혼합된 시료를 일정한 높이로 5층으로 나누어 넣고 고무망치로 한층 당 25회 씩 타격하여 최소 건조단위중량을 구하였다. 한 층에 25회 타격 할 때 몰드의 한 면에 3회씩 번갈아 가면서 양쪽 면을 타격하고 마지막 8회 째는 4회 타격하였다(Bowels, 1992). 자갈 혼합율에 따른 공시체의 간극비 및 건조단위중량의 최대치와 최소치는 그림 6과 같다.

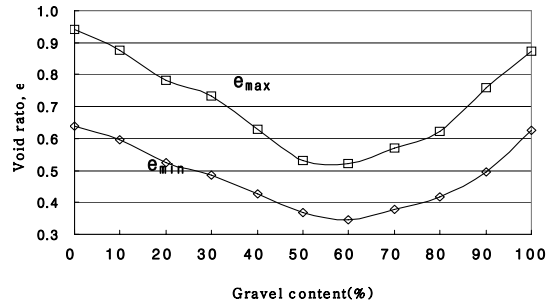
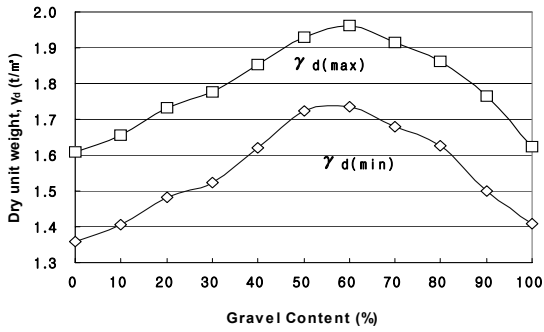


그림 6. 자갈 혼합률에 따른 단위중량과 간극비 분포

3.2 공시체 성형 및 포화

본 연구에서는 직경 50mm, 높이 100mm인 공시체를 사용하였다. 사용된 시료는 모래와 입경차이가 큰 자갈을 혼합한 공시체이므로 공시체 성형 시 자립에 어려움이 따른다. 따라서 모래입자 사이에 발생하는 모관압을 이용하여 공시체를 자립시키기 위해 습윤 다짐방법을 이용하였으며 수중침강법 등에서 발생할 수 있는 재료분리를 방지하였다. 시료의 성형과정은 시료를 Ladd(1978)가 제안한 다짐방법에 의해 5층으로 나누고 단면이 원형인 다짐봉(tamper)을 사용하여 공시체를 성형하였다. 시료를 상대밀도에 맞게 중량을 나누어 담은 후 탈기수를 함수비 3%~5%가 되도록 고르게 혼합하였다. 혼합된 시료를 성형몰드 속으로 낙하높이 없이 뿌려 넣었다. 이와 같이 하나의 층에 해당하는 시료를 모두 넣고 정해진 층 두께가 유지되도록 미리 계산에 의해 정해진 높이로 다짐봉을 이용하여 다져주었다. 이와 같은 방법으로 성형몰드 속으로 5층으로 다져 넣은 후 거름종이를 깔고 탑 캡을 씌운 후 고무링을 끼워 고정시켰으며 로드를 내려 탑 캡에 끼운 뒤 잠갔다. 몰드 내에 시료성형과정이 완료되면 몰드를 해체하고 시료의 높이가 정확한가를 확인하기 위하여 측정하였다.

시료제작이 완료되면 공시체를 포화시키기 위하여 CO₂ 가스를 5kPa의 압력으로 약 3시간 동안 시료의 하부 캡을 통하여 주입시키고 상부 캡을 통하여 배출시킴으로써 시료 간극내의 공기를 모두 CO₂ 가스로 치환하도록 하였다. CO₂ 가스 치환이 완료되면 탈기수를 자연 동수경사를 이용하여 시료내부로 완전 순환이 이루어질 때까지 주입시켰다. 순환이 완료되면 공시체를 삼축기에 안치시킨 후 구속압과 배압의 차이를 약 2kPa 정도로 하여 50kPa 씩 증가시켜 포화시켰다. 각 단계에서 일정시간 경과한 후에 구속압을 100kPa 까지 증가시켰을 때 발생하는 과잉간극수압을 측정하여 Skempton의 B-value가 0.97이상 일 경우 시료가 완전히 포화되었다고 간주하였다.

3.3 압밀 및 삼축압축시험

상태정수 계산 시 초기의 간극비는 등방압밀 시킨 후 공시체의 간극비로 계산하였다. 이 조건을 만족시키기 위해서 압밀 과정의 부피의 변화를 고려하여 압밀 종료 후 상대밀도를 계산하였다. 간극수압이 소산되어 배압과 거의 비슷한 상태가 되면 배수밸브를 잠그고 약 1~2분간 과잉간극수압의 발생 여부를 관찰하였다. 이 결과 과잉간극수압이 더 이상 발생하지 않고 간극수압의 변화가 없다면 압밀이 종료되었다고 판단하였다.

자갈혼합율이 높을수록 간극비가 감소하므로 압밀 시간이 길어지는 경향이 있었다. 따라서 압밀이 종료되지 않았다고 판단되는 경우는 압밀이 종료될 때까지 구속압을 변화시키지 않고 유지하여 압밀을 진행시켰다. 압밀이 종료되고 구속압 조건을 맞추면 비배수 상태로 1%/min의 변형률로 축방향으로 전단응력을 주어 변형률에 따른 축차응력, 간극수압을 측정하였다. 이와 같은 시험을 구속압을 달리하여 반복함으로써 각 혼합율의 정상상태선(SSL)에 따른 상태정수를 맞추어 응력 거동을 확인하였다.

3.4 시험 종류

본 연구에서는 모래에 자갈혼합율(GC)을 중량비로 0%에서 100%까지 10% 단위로 변화시키고 각각의 혼합율에 대해 최대 밀도, 최소 밀도 시험을 수행하였다. 그 결과 자갈혼합율 60%에서 최대건조단위중량을 나타내는 것으로 밝혀졌다. 이 결과로부터 자갈혼합율을 0%, 20%, 40%, 60%의 네 가지로 제작하여 삼축압축시험을 실시하였다. 우선 각각의 혼합율에 따른 정상상태선을 도출하였다. 그리고 한 가지 혼합율에 대해 세 가지 이상의 상대밀도를 갖는 공시체를 제작하여 각각의 공시체에 구속압을 조절하여 양의 상태정수와 음의 상태정수의 조건에서 응력 거동을 살펴보았다. 세부 실험 조건은 표 2와 같다.

표 2. 삼축압축시험 세부 조건

GC(%)	목표상대밀도 Dr(%)	σ_3 (kPa)	시험물성		ψ	
			e	Dr(%)		
0	20	200	0.887	17.7	-0.181	
		900	0.892	16	0.144	
	40	400	0.822	39.3	-0.096	
		1200	0.82	40	0.133	
	90	300	0.673	89	-0.313	
		1400	0.670	90	0.020	
20	20	200	0.743	14.8	-0.100	
		500	0.737	17.2	0.125	
		500	0.743	14.8	0.132	
	40	320	0.682	39.2	-0.103	
		600	0.675	42	0.110	
	60	320	0.630	60	-0.094	
		90	100	0.558	88.9	-0.451
			500	0.558	88.9	-0.053
	500		0.556	89.6	-0.055	
	70	700	0.556	89.6	0.029	
20		200	0.602	13.3	-0.149	
	500	0.600	14.2	0.067		
40		100	0.550	38.1	-0.371	
	650		0.548	39	0.077	
	74	500	0.478	72.4	-0.055	
90	100	0.451	85.2	-0.462		
	900	0.453	84.3	0.060		
60	20	100	0.487	18.3	-0.132	
		400	0.490	16.7	0.045	
	40	200	0.454	36.7	-0.080	
		550	0.450	38.9	0.045	
	88	500	0.362	87.7	-0.055	
	90	100	0.363	87.2	-0.259	
1100		0.363	87.2	0.046		

4. 시험 결과

4.1 자갈혼합율에 따른 정상상태선

자갈혼합율 0%, 20%, 40%, 60%에 대한 비배수 삼축압축시험으로부터 결정된 정상상태선을 그림 7에 나타내었다. 여기서 e 는 간극비, p' 은 평균유효구속압이다. 각 혼합율에 대해 세 가지 이상의 상대밀도를 선정하고 각각의 상대밀도에 대하여 구속압에 변화를 주어 구속압의 크기에 관계없이 응력 경로가 정상상태 점에 수렴하는지를 확인하였다. 그 결과 자갈혼합율과 상대밀도가 같다면 구속압에 관계없이 유사한 응력상태(p')에 도달하는 것을 알 수 있었다. 또한 자갈혼합율에 따른 정상상태선의 기울기는 그림 7에 나타난 바와 같이 자갈혼합율과 크게 상관성을 가지고 있지 않

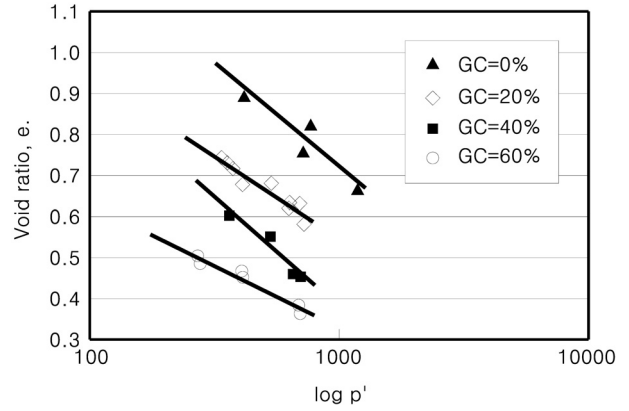


그림 7. 자갈혼합율에 따른 상태정수선의 변화

으나 혼합율이 작을수록 간극비가 크므로 정상상태선은 e - $\log p'$ 좌표의 상부에 위치함을 알 수 있어 간극비에 의존함을 알 수 있다. Been과 Jefferies(1985)에 의한 실험결과에서도 모래-실트 혼합토의 정상상태선 형상은 혼합토의 간극비에 의해 기울기가 결정되어 정상상태선의 기울기 및 위치는 간극비에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

4.2 자갈 혼합율에 따른 응력 거동

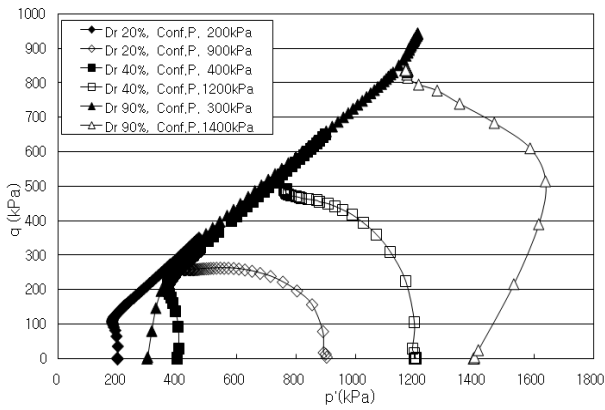
자갈 혼합율(GC) 0%, 20%, 40%, 60%에 대하여 상대밀도 20%, 40%, 90% 세 가지로 실험을 하였고 이 때의 상대밀도는 압밀 종료 후의 시험상대밀도로 하였다. 단 일부 시험상대밀도가 목표상대밀도에 미치지 못하는 경우가 있으나 이해의 편의를 도모하기 위하여 목표상대밀도로 표현하였다. 그리고 각 상대밀도에 대해서 양의 상태정수와 음의 상태정수를 비교하기 위해 상대적으로 작고 큰 구속압 조건을 주었다. 그에 대한 응력 거동은 그림 8의 p' - q 좌표에 나타내었다.

그림 8의 결과에 의하면 자갈혼합율에 따라 수렴하는 정상상태선의 기울기가 다른 것을 알 수 있다. 즉 각각의 자갈혼합율(시료의 물리적 특성) 마다 개개의 정상상태선이 존재한다는 것이다. 이렇게 자갈 혼합율에 따라 정상상태선의 기울기는 다르지만 그것의 응력 경로는 상대밀도 혹은 간극비가 아닌 구속압에 의해 지배되어 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

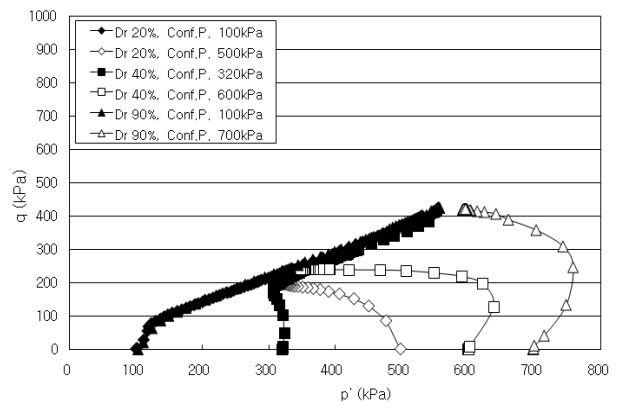
4.3 여러 가지 조건에 따른 응력 거동

4.3.1 상대밀도와 상태정수 조건에 따른 응력거동

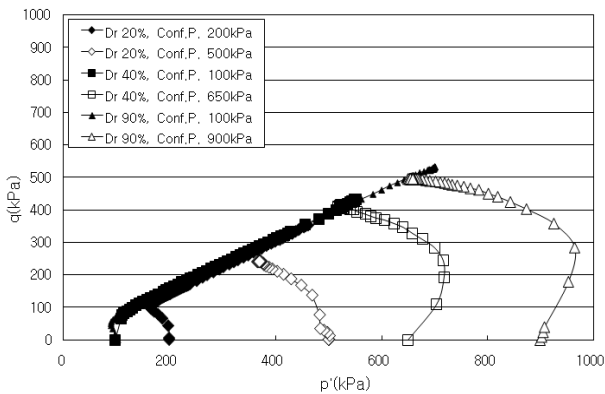
자갈혼합율(GC) 0%, 20%, 40%, 60%에 대해 상대밀도 20%, 40%, 90%의 조건에서 구속압을 조절하여 응력 거동을 살펴보았다. 그 결과 공시체의 정상상태까지의 응력 거



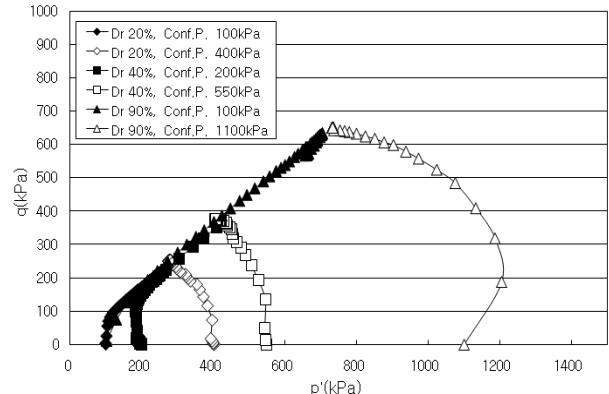
(a) 자갈함유량 0%



(b) 자갈함유량 20%



(c) 자갈함유량 40%



(d) 자갈함유량 60%

그림 8. 비배수 삼축압축시험에 의한 자갈-모래 혼합토의 응력 거동

동은 상대밀도 혹은 간극비에 의존하는 것이 아닌 간극비와 응력상태를 함께 고려한 상태정수에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

GC 0% 시료의 경우 상대밀도가 같은 시료임에도 불구하고 초기 유효구속응력에 의한 상태정수 값이 다르면 응력 거동이 다른 것으로 나타났다. 정상상태의 유효구속압(p'_{cs})으로 정규화한 그림 9(a)의 경우 상태정수 값이 0.133이고 상대밀도 40%인 시료 B는 같은 상대밀도이지만 상태정수가 -0.096인 C시료와는 다른 응력거동을 나타내고 오히려 상대밀도는 20%이지만 상태정수가 0.144인 A시료와 유사한 응력거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

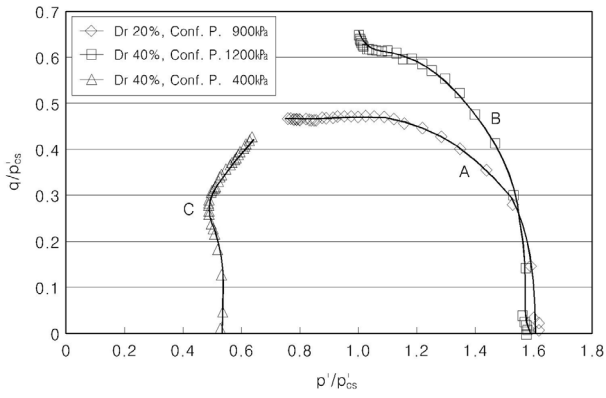
GC 20%의 시료 역시 상대밀도 혹은 간극비 보다는 상태정수에 의해 응력거동이 지배되는 것을 알 수 있다. 시료 A, B의 경우 상대밀도는 같지만 상태정수는 상대밀도 40%인 A시료와 상대밀도 60%인 C시료가 음의 값을 갖으며 정상상태까지의 응력거동 역시 유사하였다.

GC 40%와 GC 60%의 시료 역시 압밀 종료 후의 초기상태에서 파괴 후 정상상태까지의 응력거동은 상대밀도 혹은 간극비에 의존하기 보다는 상태정수 값에 의존한다는 것을 알 수 있다.

4.3.2 유효구속응력 조건에 따른 응력거동

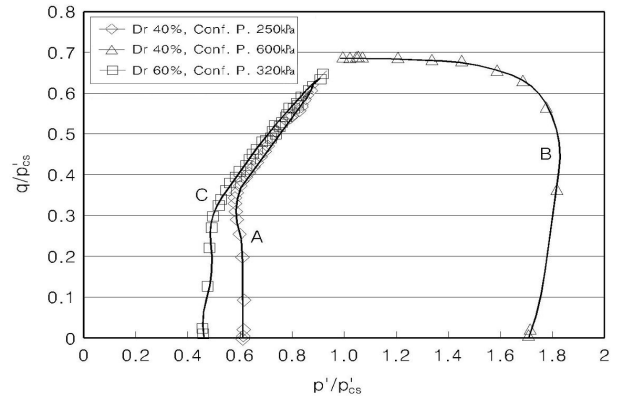
두 가지의 다른 상대밀도(간극비)를 갖는 공시체에 같은 유효구속응력의 조건을 주어 응력 거동을 비교해 보았다. 그림 10은 자갈 혼합율 20%인 시료에 대해 유효구속응력은 500kPa로 동일하고 상대밀도가 각각 20%와 90%인 공시체를 제작하여 실험하였다. 상대밀도가 다른 공시체의 경우 간극비에 의해 초기 위치가 결정되므로 20% 공시체는 p' - e 좌표에서 상태정수는 양의 값 0.132로 비배수시험시 A점으로부터 실선으로 표시된 정상상태선을 향하여 이동하며 느슨한 흙의 전형적인 거동을 보인다. 90% 공시체는 p' - e 좌표에서 상태정수는 음의 값 -0.053으로 정상상태선보다 아래에 위치하며 조밀한 거동을 보임을 알 수 있다.

같은 상대밀도를 갖는 두 가지의 공시체에 대하여 다른 유효구속응력의 조건에서 응력 거동을 살펴보았다. 그림 11은 자갈혼합율 20%인 시료를 사용하여 상대밀도 40%로 동일하게 조성된 공시체에 대하여 유효구속응력을 각각 600kPa와 320kPa로 가한 경우의 비배수 거동을 나타낸 것이다. 같은 상대밀도라도 유효구속응력 600kPa인 공시체의 경우 상태정수가 0.11로써 양의 값(A점)을 가져 느슨한 거동을 보이는 것을 알 수 있으며, 유효구속응력 320kPa인 공시체의 경



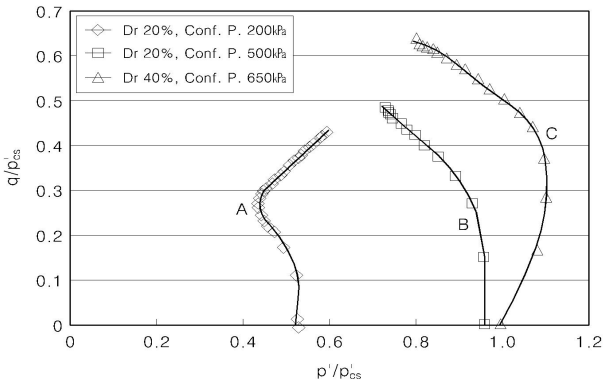
구분	Dr(Relative Density, %)	ψ	e	$\sigma_3(kPa)$
A	20	0.144	0.892	900
B	40	0.133	0.82	1200
C	40	-0.096	0.822	400

(a) 자갈함유량 0%



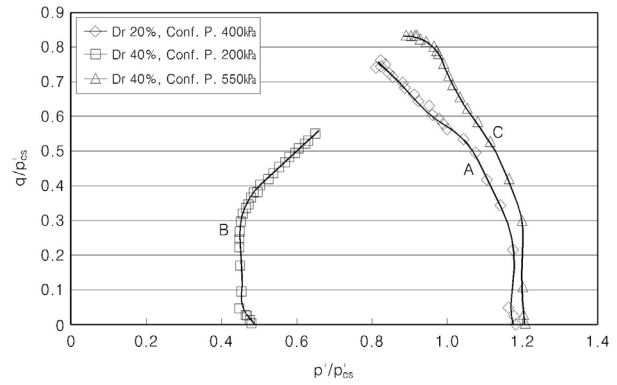
구분	Dr(Relative Density, %)	ψ	e	$\sigma_3(kPa)$
A	40	-0.103	0.682	250
B	40	0.11	0.675	600
C	60	-0.094	0.63	320

(b) 자갈함유량 20%



구분	Dr(Relative Density, %)	ψ	e	$\sigma_3(kPa)$
A	20	-0.149	0.602	200
B	20	0.067	0.6	500
C	40	0.077	0.548	650

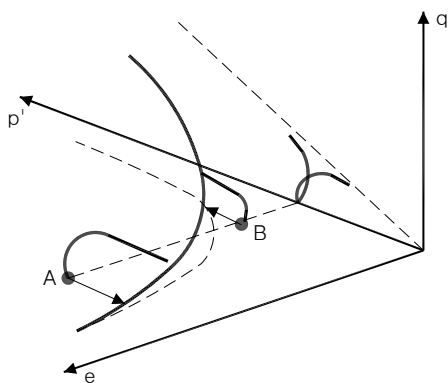
(c) 자갈함유량 40%



구분	Dr(Relative Density, %)	ψ	e	$\sigma_3(kPa)$
A	20	0.045	0.487	400
B	40	-0.08	0.454	200
C	40	0.045	0.45	550

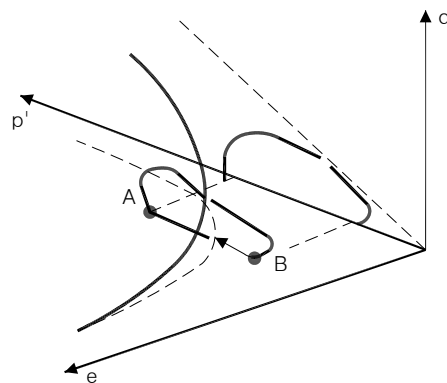
(d) 자갈함유량 60%

그림 9. 상대밀도와 상태정수 변화에 따른 응력거동



구분	Dr(%)	e	$\sigma_3(kPa)$	ψ	거동
A	20	0.743	500	0.132	느슨
B	90	0.558	500	-0.053	조밀

그림 10. 상대밀도에 따른 $p-q-e$ 좌표에서의 응력거동



구분	Dr(%)	e	$\sigma_3(kPa)$	ψ	거동
A	40	0.675	600	0.11	느슨
B	40	0.682	250	-0.103	조밀

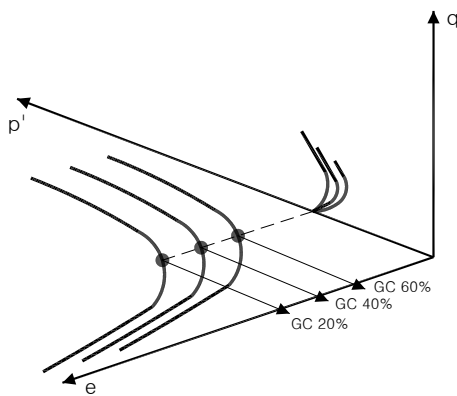
그림 11. 동일 상대밀도에서 상태정수의 변화에 따른 $p-q-e$ 에서의 응력거동

우 상태정수가 -0.103(B점)으로써 조밀한 응력 거동을 보였다. 이로써 상대밀도 혹은 간극비가 동일하다 할지라도 유효구속응력의 변화, 즉 상태정수가 다른 값을 갖는다면 응력 거동은 확연히 다른 것을 알 수 있다.

그림 12는 자갈혼합을 별로 같은 상태정수를 갖는 조건에서의 응력거동을 나타낸 것으로 유효구속응력은 동일한 조건을 주었고 상대밀도를 조절함으로써 동일한 상태정수를 갖도록 하였다. 시험 결과 자갈혼합율에 상관없이 상태정수가 유사하다면 응력 거동도 유사함을 알 수 있다.

4.4 비배수 전단강도와 상태정수와의 관계

그림 13은 모래의 비배수 전단강도와 상태정수와의 관계를 도시한 것이다. 이 그림으로부터 상태정수(ψ)와 정규화한 q_{max}/σ_3 는 회귀분석 결과 $r^2 = 0.7541$ 로 비교적 양호한 상관성을 갖고 있으며 이 결과로부터 어떤 시료 혹은 지반의 상태정수와 구속압을 안다면 비배수 전단강도(q_{max}) 값을 추정할 수 있을 것이다.



구분	Dr(%)	e	$\sigma_3(kPa)$	ψ	거동
GC 20%	90	0.556	500	-0.055	조밀
GC 40%	74	0.478	500	-0.055	조밀
GC 60%	88	0.362	500	-0.055	조밀

그림 12. 자갈함유량에 따른 $p-q-e$ 좌표에서의 응력거동

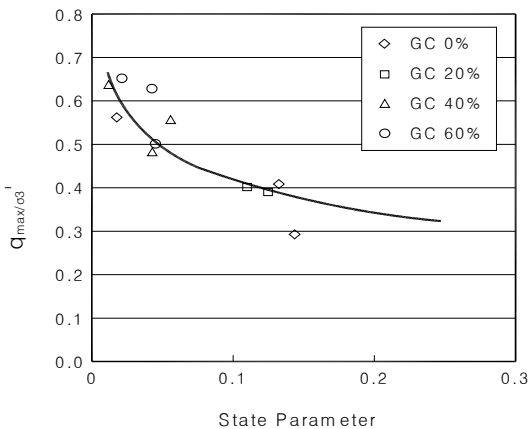


그림 13. 상태정수에 따른 침투 비배수강도 변화

을 추정할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 자갈질 혼합토의 응력 거동을 연구함에 있어 기존의 상대밀도 혹은 간극비가 아닌 Been과 Jefferies (1985)가 제안한 상태정수를 도입하여 자갈 모래 혼합토의 응력 거동을 고찰하였다. 자갈혼합율(GC) 0%, 20%, 40%, 60%인 시료의 상대밀도를 20%, 40%, 90% 세 가지를 만족 하도록 공시체를 제작하였고 각각의 상대밀도에 대하여 상대적으로 작거나 큰 유효구속응력을 주어 상태정수 값을 조절하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 자갈혼합율에 대한 정상상태선을 구한 결과 정상상태선의 위치 및 기울기는 그 시료의 간극비의 범위에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 그 결과 자갈혼합율이 가장 작은 GC 0%인 시료의 정상상태선이 가장 위에 GC 60%인 시료의 정상상태선이 가장 아래에 위치하였다.
- (2) 자갈질 흙에서 자갈혼합율, 상대밀도, 간극비, 유효구속응력 등의 조건이 다르더라도 상태정수가 유사하다면 유사한 거동을 나타내었다.
- (3) 상태정수와 비배수 전단강도와의 관계를 분석한 결과 양호한 상관성을 나타냈으며 특정 시료 혹은 지반의 상태정수와 구속압으로부터 비배수 전단강도(q_{max}) 값을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김방식, 강병희, 윤여원(2007), 자갈-모래 혼합토의 액상화 거동, *한국지반공학회논문집*, Vol. 23, No. 10, pp. 47~56.
2. 김방식, 윤여원, 백준우(2005a), 등방압밀된 자갈-모래 혼합토의 액상화 거동, *2005 학술발표회*, 한국지반환경공학회, pp. 321~326.
3. 김방식, 윤여원, 이승훈(2005b), 이방압밀된 자갈-모래 혼합토의 액상화 거동, *2005 학술발표회*, 한국지반환경공학회, pp. 279~284.
4. Been, K. and Jefferies, M. G.(1985), A State Parameter for Sands, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 99~112.

5. Castro, G.(1975), Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 101, No. GT6, pp. 551~569.
6. Castro, G. and Poulos, S. J.(1977), Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 106, No. GT6, pp. 501~506.
7. Evans, M. D. and Rollins, K. M.(1995), Development in Gravelly Soil Liquefaction and Dynamic Behavior Position, *Proceeding of the International. Workshop on the Physics and Mechanics of Soil*, pp. 91~102.
8. Haga, K.(1984), *Shaking Table Tests For Liquefaction of Gravel-Containing Sand*, Bachelor Thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Tokyo, pp. 15~35, (in Japanese).
9. Kokusho, T. and Hiraoka, R.(2004), Undrained Shear Strength of Granular Soils with Different Particle Gradation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 6, pp. 621~629.
10. Kramer, S. L.(1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, pp. 221~222.
11. Ladd, R. S.(1978), Preparing Test Specimens using Under-compaction, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16~23.
12. Wang, W.(1984), Earthquake Damage to Earth and Levees in Relation to Soil Liquefaction, *Proceeding of the International Conference on Case Histories on Geotechnical Engineering*, Vol. 1, Univ. of Missouri-Rolla, Rolla, pp. 511~521.

(접수일: 2009. 8. 24 심사일: 2009. 9. 8 심사완료일: 2010. 7. 7)