

굴패각 혼합토의 비배수 전단강도 특성

The Undrained Shear Strength Characteristics of Mixed Soil with Oyster Shells

손 영 진*¹ Son, Young-Jin

김 기 영*² Kim, Ki-Young

문 홍 득*³ Mun, Hong-Deug

Abstract

In this study, undrained shear test was performed K_0 consolidation in order to study the shear strength characteristics of oysters-marine clay mixtures for three mixed ratios(0%, 25% and 50%). And, in order to study shear strength characteristics of oysters-marine clay mixtures, three different effective vertical stresses(200, 300 and 400kPa) were applied for the K_0 consolidation tests. In addition three different axial strain rates(0.005%/min, 0.05%/min, 0.5%/min) were applied for the case of effective vertical stress, 300kPa. According to experimental results, the more mixed ratios were increased, the more deviator stress was increased by crushing effect of oysters particles. especially, when effective vertical stress is 300kPa and mixed ratio increase from 25% to 50%, Test shows the increase of shear strength. But axial strain rate was not effect on the undrained shear strength. In the comparison and analysis that are based on the values of tests on the oysters-marine clay mixtures and the Mayne & Bishop's empiric formula, the undrained shear strength ratio shows a similar pattern of the tests. But for the prediction of the coefficient of the pore water pressure, the value of empiric formula shows more overestimated than the values of the tests at 0%, mixture ratio.

요 지

본 연구에서는 굴패각 혼합토의 전단강도 특성을 파악하고자 해성토에 굴패각 혼합을 0%, 25% 그리고 50%로 달리 한 후 K_0 비배수 삼축압축 실험을 실시하였다. 또한 각 혼합비에 따라 유효 연직압을 200kPa, 300kPa 그리고 400kPa로 적용하였고, 유효 연직압 300kPa에 대해서 전단속도를 세가지로 달리하여 그에 따른 혼합토의 전단강도 특성을 알아 보았다. 일련의 실험결과로부터 굴패각 혼합비가 증가할수록 굴패각 입자의 파쇄로 인해 전단강도가 증가함을 볼 수 있었으며, 전단속도는 굴패각 혼합토의 전단강도에 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다. 굴패각 혼합토의 실내실험과 Mayne, Bishop의 경험식을 토대로 비교 분석한 결과 비배수 전단강도는 실험값과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 간극수압계수 예측은 혼합비 0%에서 경험식이 실험값과 보다 과대 평가를 보이고 있다.

Keywords : K_0 consolidation test, Mixed soil, Oyster shells, Undrained shear strength

1. 서 론

우리나라의 남해 및 일부 서해 연안에서 굴을 채취하

고 이를 제거한 후 껍질이 굴 집하장 주변에 폐기물로 방치되고 있어 굴패각으로 인한 오염수 유출 및 주변지역주민의 주거환경 악화 그리고 미관상의 문제 등으로

*1 경북대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook Nat. Univ.)

*2 정회원, 경북대학교 토목공학과 공학박사 (Member, Ph.d., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook Nat. Univ., kky0606@empal.com)

*3 정회원, 진주산업대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Jinju Nat. Univ.)

굴뚝질들을 소비하기 위해 소량이지는 하지만 굴재모 및 비료의 원료로 사용되고 있다. 최근에는 건설자원의 고갈, 건설비용의 상승, 환경보존 및 폐기물 활용에 대한 사회적 요구의 증가등을 이유로 실제 자연 지반에 존재하지 않는 이물질등을 포함한 혼합토도 만들어지고 있다. 이 혼합토는 흙 뿐만 아니라 인공재료, 폐기물 등을 망라한 복수 이상의 재료로 구성된 흙을 의미한다. 혼합토에 관한 연구는 점토와 모래로 구성된 혼합토에 관한 연구가 대부분이다. Trollope & Zafar(1965)는 모래와 점토로 구성된 혼합토의 배수삼축실험의 결과로부터 점성토와 사질토의 경계를 나타내는 세립분 함유율의 존재를 규명하고자 하였다. 또한 Fukue & Okusa & Nakayama(1986)는 세립함유율이 감소하고 조립자의 골격구조를 형성하는 경우와 형성하지 않는 경우의 두가지 상태로 나누어 생각하고 이때의 경계를 나타내는 간극비를 가지고 혼합토의 공학적 특성을 평가하는 기법을 제시하였다. Nakase(1983)는 모래와 점토로 구성된 혼합토의 비배수 강도의 이방성이 소성지수의 감소와 함께 증가하는 것을 밝혀냈다. Skempton & Bishop (1954)은 소성지수가 같은 흙들은 비교적 같은 크기의 응력을 가지고 있으며 Ladd et al(1977)은 소성지수가 감소할 수록 더 큰 전단강도를 가진다는 결론을 제시하였다.

그러나 국내 경우 윤길림(2000), 이기호(2001)등이 굴재각 활용방안에 대해 연구중이만 지반공학 분야에서의 그 활용성은 극히 미약한 실정이다. 따라서 본 연구는 경남 남해지역의 해성토를 굴재각과 혼합한 후 K_0 삼축시험을 실시하여 혼합비에 따른 비배수 전단강도 특성을 연구함으로써 성토재료, SCP(Sand Compaction Pile)재료 그리고 토목재료로서 재활용 적합성 유무를 검증하기 위한 기초자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 혼합토의 특성

2.1 혼합재의 특성

혼합재의 특성에 따라 혼합토의 역학특성은 다양하게 나타난다. 혼합재를 개략적으로 분류하면 다음과 같다.

- 1) 반응성 효과
- 2) 변형성 효과
- 3) 파쇄성 효과

파쇄성 특성은 파쇄성, 비파쇄성, 반파쇄성으로 구분할 수 있다. 파쇄성은 주어진 조건, 혼합비, 구성요소 상호간의 작용등에 의해 파쇄특성은 변한다. 따라서 파쇄

성이 혼합토에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 혼합조건과 혼합물질의 상호작용을 충분히 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 굴재각 파쇄여부를 확인하기 위해 굴재각 파쇄지수를 표 1에 나타내었다.

표 1. 굴재각 시료의 파쇄지수

구분	유효연직압 (300kPa)	유효 연직압 (400kPa)
B_0 (파쇄가능지수)	1.65	1.65
B_1 (전체파쇄지수)	0.25	0.3
B_r (상대파쇄지수)	0.15	0.18

* Hardin(1985) 참조

2.2 응력분담율의 산정

그림 1은 굴재각과 점토로 구성된 혼합토의 응력 분담율을 실험적 방법으로 산정한 것이다.

그림에 따르면 최종 간극비에 대응하는 압밀 응력은 혼합체에 작용하는 외부하중에서 실제로 점토부분에 작용하는 하중을 의미하며 굴재각 혼합비가 증가하면 점토부분에 작용하는 하중도 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 순수한 점토와 굴재각이 첨가된 혼합토에 동일 하중을 재하한다 하더라도 점토 부분에 작용되는 하중이 다르므로 점토의 골격구조 및 간극비도 상이한 특성을 나타내는 것을 의미한다.

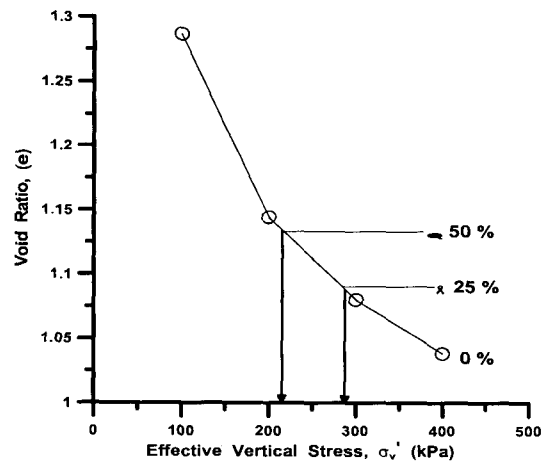


그림 1. 응력분담율의 산정(이기호, 2001)

3. 실험

3.1 기본 물성치

해성토와 굴재각은 경남 남해 지역에서 채취했으며, 먼저 채취된 해성토와 굴재각을 완전 건조시킨 후, 해성토의 경우 NO.40체를 통과하는 시료를, 그리고 굴재각

표 2. 시료의 기본 물성치

혼합률	물성치	비중	액성한계	소성한계	USCS 및 굴패각입자 크기
0%		2.69	47.0	25.0	CL (해성토)
25%		2.55	37.3	17.0	1.41-4.76 mm (굴패각)
50%		2.42	30.2	13.1	1.41-4.76 mm (굴패각)

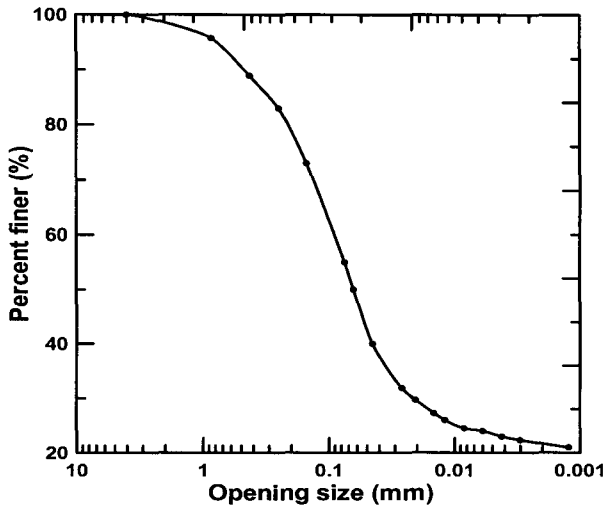


그림 2. 해성토의 입도분포

의 경우 No.4체를 통과하고 No.14체에 남는 시료를 해성점토와 25%, 50%의 중량비로 혼합하여 사용하였다. 굴패각 혼합토의 기본 물성치는 표 2와 같고 해성토의 입도 분포는 그림 2에 나타내었다.

3.2 실험장치

삼축압축시험기는 현장상태의 여러 지반조건을 재현하여 각종 토질정수와 거동특성을 파악할 수 있는 가장 광범위하면서도 신뢰성이 높은 실험장치이다. 일반적으로 지반의 응력상태는 K_0 상태로 존재하지만 대부분의 실내 삼축시험은 등방상태로 수행되는 것이 대부분이다. 따라서 보다 정확한 지반 응력상태를 재현하기 위해서는 K_0 삼축시험이 필수적이라 할 수 있다. 본 시험에 사용된 K_0 삼축압축 시험장치의 제어방식은 고도의 정밀도를 가진 자동모터가 Transducer에 의해 측정된 체적변형률과 축변형률을 동일하도록 연직응력과 수평응력을 조절하는 방식으로 실시하였으며 압밀시 시료의 허용 축방변형률 $\pm 0.02\%$ 수준으로 제어하였다. 이 제품은 미국 GEOCOMP사에서 제작된 것으로 등방압밀, K_0 압밀, 이방압밀, 삼축투수시험, Rowe 압밀시험 그리고 일축 및 CBR 시험이 가능한 다기능 시험장치로서 하나의 자동 하중장치(Load Trac-II)와 2개의 독립된 압력장치(Flow Trac-II)로 구성되어있다.

3.3 실험방법

ASTM(1970)에 의하면 공시체의 직경은 시료 최대입경의 10배정도가 적합한 것으로 제시하고 있으므로 직경 5cm인 공시체에 최대입경 4.76mm인 굴패각을 사용해 실험을 실시하였다. 이에 반해 굴패각의 크기가 클 경우는 현장상태와도 상이하며 공시체 성형시 Trimming 작업이 용이하지 않아 이를 피하기 위해 사진 1과 같이 직접 제작한 직경 5cm, 높이 약 10cm인 공시체 몰드를 이용하여 굴패각 혼합비 0%, 25%, 50%에 대해서 60kPa의 압력으로 예비 성형하였다. 그 후 포화단계에서는 배압법을 사용하여 배압을 45kPa, 95kPa, 145kPa로 단계적으로 증가시켜 B계수가 0.95이상 나올 때까지 완전히 포화시킨다. 그 후 유효연직압을 200kPa, 300kPa, 400kPa로 K_0 압밀을 실시한 후 비배수 전단실험을 하여 혼합비와, 유효연직압력에 관한 전단강도 특성을 분석하였고, 전단속도의 영향에 대한 강도 특성을 알아보기 위해 유효연직압 300kPa로 압밀한 후 공시체를 0.5%/min, 0.05%/min, 0.005%/min로 전단속도를 달리하여 실험하였다.



사진 1. 예비압밀 몰드

3.4 실험종류

본 연구에서 실시한 실험종류는 표 3과 같다.

표 3. 실험종류

K ₀ 압밀								
굴패각 혼합비(%)	유효연직압 (kPa)	전단속도 (%/min)	혼합비	유효연직압	전단속도	혼합비	유효연직압	전단속도 (%/min)
0%	200	0.05	25%	200	0.05	50%	200	0.05
		0.5			0.5			
	300	0.05		300	0.05		300	0.05
		0.005			0.005			
	400	0.05		400	0.05		400	0.05

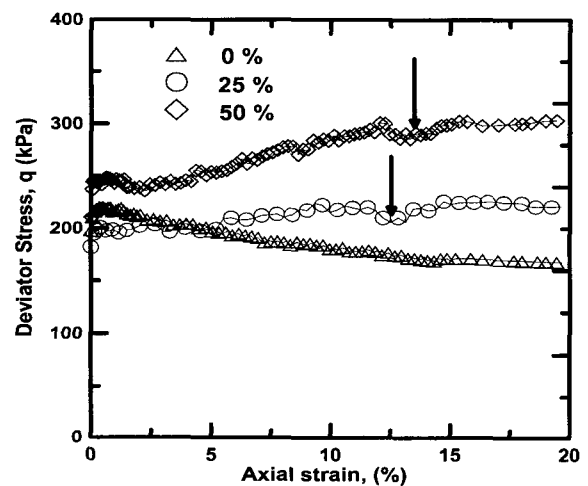
4. 실험결과 및 분석

4.1 굴패각 혼합토의 전단강도

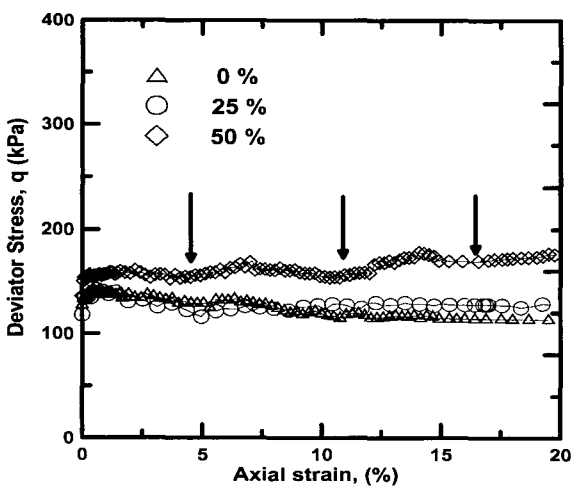
4.1.1 응력-변형률

그림 3을 살펴보면 혼합비 0%는 유효연직압에 관계 없이 2% 이내에서 최대 응력값을 나타낸 후 서서히 응력이 감소하는 응력연화 현상을 보이고 있지만 25%, 50%의 혼합비일 경우에는 구속압이 증가함에 따라 응력경화에 가까운 거동특성을 보이고 있다. 특히 25%, 50%의 경우는 굴패각의 영향으로 그래프에서 표시한 화살표 지점에서 일시적인 강도저하와 강도증가가 반복적으로 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 굴패각과 해성토간의 마찰력과 굴패각의 골격구조가 새롭게 재배열되는 구조적 메카니즘 과정으로 보여지며, 이를 간접적으로 증명하기 위하여 실시한 혼합비 25%에 대한 시험 전 후의 굴패각 입도분포의 변화를 살펴보면 그림 4와 같이 구속압 300, 400kPa에서 시험 후 No.14 번째

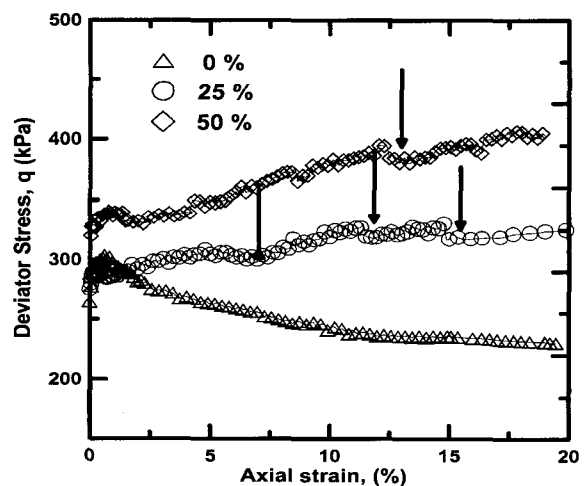
를 통과하는 양이 약 20% 정도 증가함을 알 수 있었다. 또한 혼합비 25% 이상에서 발생하고 있는 응력경화 현상은 순수점토에 대한 전형적인 K₀ 실험의 응력 연화현상과는 다른 양상이며, 이러한 결과는 이기호(2001)의 등방 삼축실험을 통한 굴패각 혼합토의 전단강도 특성 연구 결과와 전반적인 경향면에서 비슷한 현상이다.



(b) 300kpa



(a) 200kpa



(c) 400kpa

그림 3. 유효연직압에 따른 응력-변형률

그림 3. 유효연직압에 따른 응력-변형률

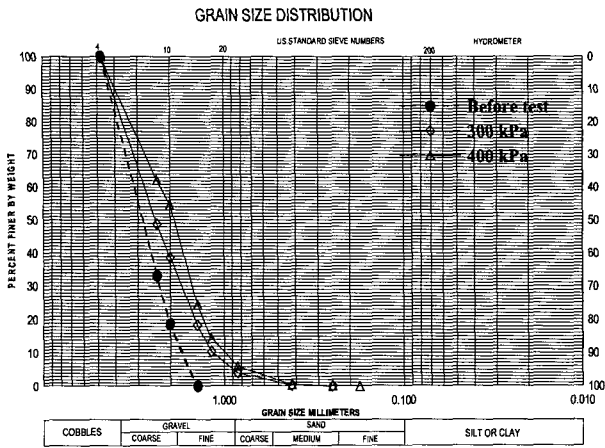


그림 4. 시험 전 후의 입도분포(혼합비 25%)

4.1.2 비배수 전단강도

그림 5는 혼합비와 유효연직압에 따른 비배수 전단강도를 도시한 결과이다. 전반적으로 굴패각 혼합비가 증가할수록 혼합토의 비배수 전단강도는 증가하는 경향을 보이며, 특히 혼합비가 0~25% 구간보다 25~50% 구간에서 강도 증가 양상이 뚜렷하며 동일한 혼합비일 경우 구속압이 증가함에 따라 강도 역시 증가함을 나타내고 있다. 따라서 혼합비가 25~50% 범위에서 전단저항에 가장 유리한 골격구조를 나타내는 것으로 판단된다. 혼합비에 따른 내부 마찰각의 변화를 살펴보면 혼합비 0%의 경우 대략 31.6°로 나타났으며, 혼합비 25%와 30%에서는 각각 35° 및 47°로 나타나 혼합비 증가가 내부마찰각에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

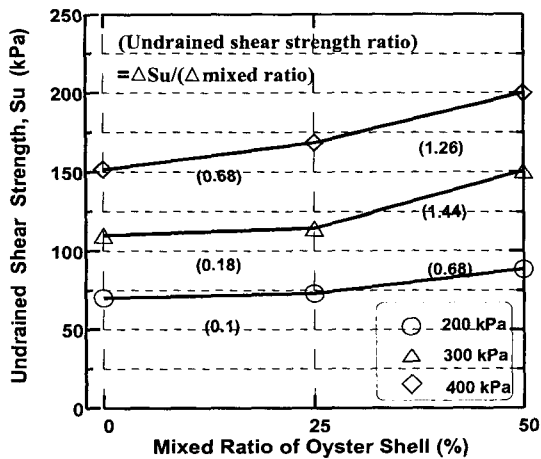
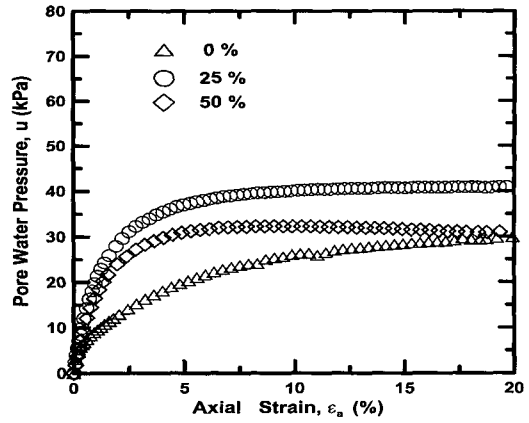


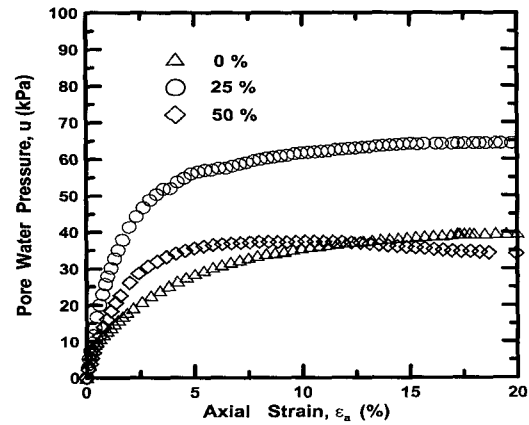
그림 5. 굴패각 혼합비와 전단강도

4.1.3 간극수압-변형률

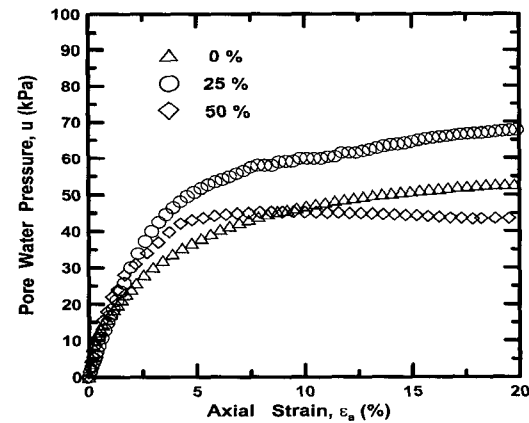
그림 6의 간극수압 그래프에서는 대체적으로 유효연직압 증가시 간극수압도 증가하는 경향이다. 그러나 굴패각 혼합비에 따른 간극수압의 경향은 뚜렷하게 나타



(a) 200kPa



(b) 300kPa



(c) 400kPa

그림 6. 유효연직압에 따른 간극수압-변형률

나지 않았다. 이는 혼합비에 따라 굴패각을 제외한 점토가 받는 응력 분담율과 전단시 발생하는 굴패각의 입자 파쇄가 주요원인으로 추측되며 보다 확실한 검증을 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4.1.4 간극수압계수

그림 7은 파괴시점의 간극수압계수를 나타낸 것으

로 굴패각 혼합비 25%일 때의 간극수압계수가 유효 연직압 200kPa를 제외하고는 가장 큰 값을 나타낸다. 이는 혼합비 0%의 응력분담율이 혼합비 50%보다는 더 크기 때문이라 사료된다. 그리고 200kPa의 유효연직압이 작용할 경우 0%와 25%의 간극수압계수가 비슷하게 나타내며, 그 시점의 간극수압도 비슷하기 때문이라고 판단된다.

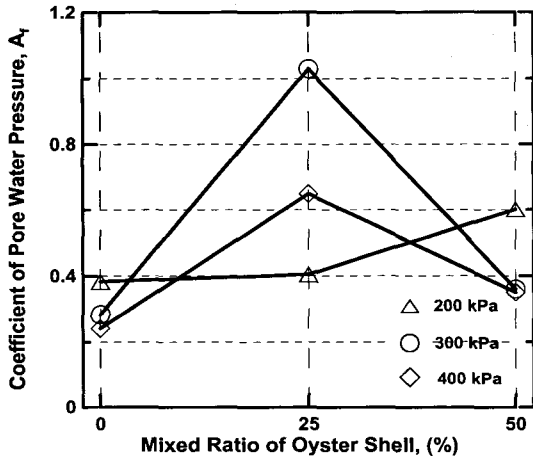
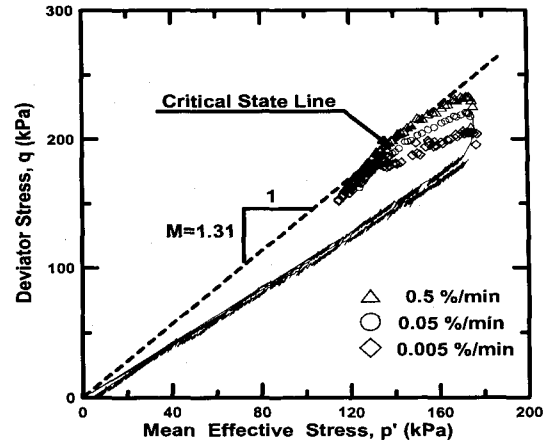


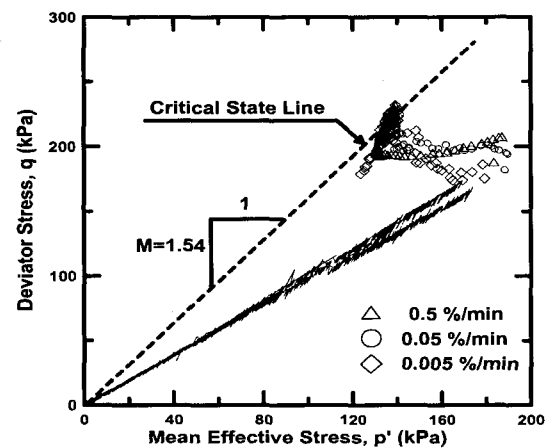
그림 7. 굴패각 혼합비와 간극수압계수

4.2 전단속도에 따른 전단강도

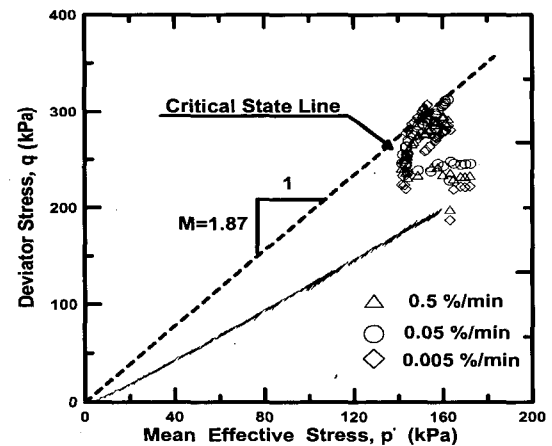
삼축압축시험시 전단강도에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있을 수 있으나 전단속도가 강도발현에 지배인자인지에 대하여는 의견이 분분하다. 본 연구에서는 굴패각 혼합비에 따라 동일한 유효연직압 300kPa로 K_0 압밀을 실시한 후 전단속도를 0.5%/min, 0.05%/min, 0.005%/min로 달리하여 그 영향성을 검토해 보았다. 그림 8(a)의 응력경로에서 보듯이 혼합비 0%의 경우 전단속도가 증가할수록 최대 유효축차응력도 함께 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향은 Ladd(1996)의 Boston점토, Alberro & Santoyo(1973)의 Mexico clay, Berre & Bjerrum(1973)의 정규압밀 점토를 대상으로 한 일련의 시험경향과 비슷한 결과이다. 반면, 그림 (b), (c)에서 알 수 있는 바와 같이 굴패각 혼합비가 25%와 50%로 증가할수록 전단속도가 전단강도에 미치는 영향이 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그러므로 굴패각 혼합토의 경우 전단강도는 전단속도의 영향보다는 혼합비에 더 지배적이라 할 수 있겠다.



(a) 굴패각 혼합비 (0%)



(b) 굴패각 혼합비 (25%)



(c) 굴패각 혼합비 (50%)

그림 8. 전단속도에 따른 응력경로

4.3 경험식의 적용

4.3.1 비배수 전단강도 경험식

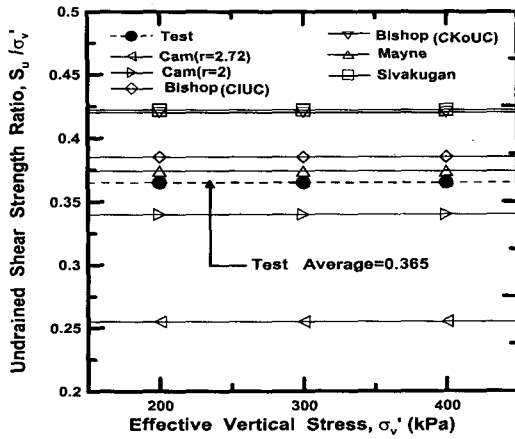
본 연구에서는 비배수 전단강도 경험식을 Wroth (1984), Skempton and Bishop(1954), Mayne(1988) 그리고 Sivakugan(1988)식으로 나누어 적용하였다. 그림 9

(a)에서처럼 굴패각 혼합비가 0%인 경우 Skempton & Bishop식과 Mayne식으로 예측된 비배수 전단강도는 각각 0.385, 0.374로 실험 결과인 0.365와 거의 비슷하게 나타났으며, Wroth의 한계상태이론에서는 간격비 2를 적용한 수정 Cam-Clay 모델이 실험치와 비교적 근접하게 나타났다. 한편 그림 9(b), 9(c)에서처럼 굴패각을 혼

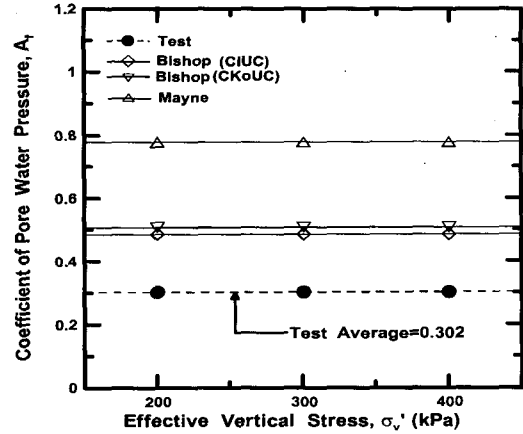
합했을 경우에는 Cam-Clay모델과 Skempton and Bishop을 제외한 모든 식에서 실험치와 근접하게 예측되었다.

4.3.2 간극수압계수 경험식

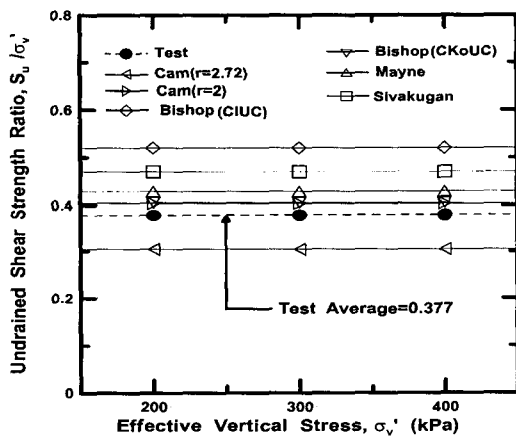
그림 10은 SHANSEP법을 이용한 Mayne식과 K_0 및 등방압밀시험에서 도출된 Skempton & Bishop식을 이



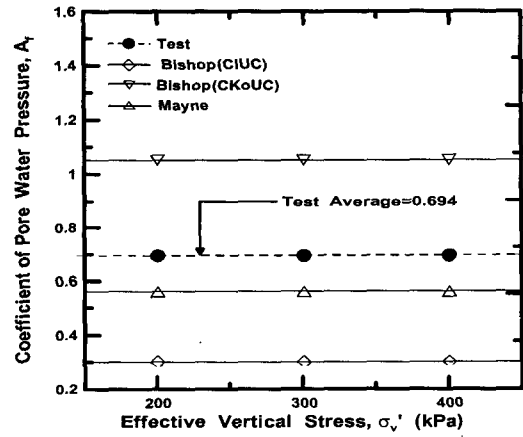
(a) 굴패각 혼합비 (0%)



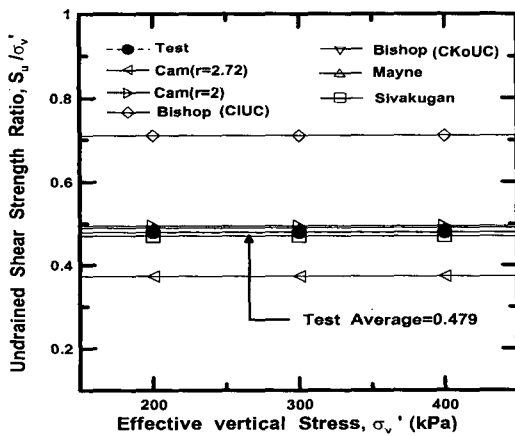
(a) 굴패각 혼합비 (0%)



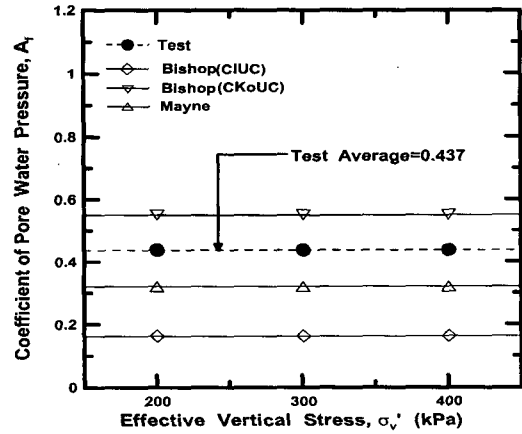
(b) 굴패각 혼합비 (25%)



(b) 굴패각 혼합비 (25%)



(c) 굴패각 혼합비 (50%)



(c) 굴패각 혼합비 (50%)

그림 9. 경험식을 이용한 비배수 전단강도 예측

그림 10. 경험식을 이용한 간극수압계수의 예측

용하여 간극수압계수를 예측한 결과이다. 그림 10(a)는 굴폐각 혼합비 0%인 경우에 3가지 식으로 예측된 간극수압계수로서 각각 0.507, 0.480, 0.778로 실측치 0.302보다 모두 과다 예측되었다. 그러나 혼합비가 증가할수록 Mayne과 Bishop(CIUC)식은 실측치에 비하여 과소 평가되는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구의 실험결과로부터 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 굴폐각 혼합비에 상관없이 유효연직압이 증가할수록 비배수 전단강도는 증가하고 특히 혼합비 0% 경우 변형률 2% 이하에서 최대강도가 발현한다. 하지만 혼합비가 25%, 50%로 증가할수록 대 변형률에서 최대강도가 발생하였으며 등방압밀 삼축 실험과 비슷한 응력경화 양상을 보였다.
- (2) 굴폐각 혼합비가 증가할수록 혼합토의 비배수 전단강도는 증가하는 경향을 보이며, 특히 혼합비 25~50% 구간에서 강도 증가 양상이 뚜렷하게 나타났다. 따라서 이 범위에서 전단저항에 가장 유리한 골격구조를 나타내는 것으로 판단되며 이는 굴폐각 입자의 파쇄가 주요 원인으로 추측된다.
- (3) K_0 압밀시 굴폐각 혼합비 25%인 경우가 혼합비 50%보다 점토의 응력 분담율이 더 크기 때문에 상대적으로 큰 간극수압을 발생시킨다.
- (4) 굴폐각 혼합비 0%일 경우 강도와 전단속도는 서로 비례하는 것으로 나타났으나 혼합비가 증가함에 따라 전단속도가 강도에 미치는 영향은 크지 않았다.
- (5) 굴폐각 혼합비가 증가할수록 Mayne, Bishop의 경험

식으로 예측된 비배수 전단강도는 실측치의 결과가 비슷하였다. 또한 파괴시 간극수압계수는 혼합비 0%의 경우 경험식이 실측치 보다 대부분 과대 평가된 반면 혼합비가 증가함에 따라 Bishop의 등방 경험식을 제외한 나머지 경험식은 실측치보다 과소 평가되었다.

참고 문헌

1. 윤길립(2000), "굴폐각을 혼합한 특수콘크리트개발", 한국해양연구회.
2. 이기호(2001), "굴폐각을 포함한 혼합토의 전단·변형특성 평가를 위한 균질화법의 적용", 한국지반공학회는논문집, 제17권, 4호.
3. Alberro, J. and Santoyo, E.(1973), "Long Term Behavior of Mexico City clay", *Soil Mech and Found.*, pp.1-9.
4. Berre, T. and Bjerrum. L.(1973), "Shear strength of Normally Consolidated clays", *Soil Mech and Found.*, pp.39-49.
5. Charles C. Ladd(1996), "Rate-Dependent Undrained Shear Behavior of Saturated Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, pp.99-108.
6. Fukue, M., Okusa, S. and Nakayama, T.(1986), "Consolidation-ofsand-clay mixtures", *ASTM, STP.*, No.892, pp.627-641.
7. Hardin, B. O.(1985), "Crushing of soil particles", *ASCE*, Vol.3, No.10, pp.1177-1192.
8. Ladd, C. C., et. al.(1977), "Stress deformation and strength characteristics", *Proc., 9th Int. Conf. on Soil Mech.*, 2, Tokyo, Japan. pp.421-494.
9. Nakase, A. and Karnei, T.(1983), "Undrained shear strength anisotropy of normally consolidated cohesive soils", *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, March, pp.91-101.
10. Skempton, A. W. and Bishop, A. W.(1954), "Soils in Building Material Their Elasticity and Inelasticity", *North Holland Publication Co. Amsterdam*, pp.417-482.
11. Trollope, D. H. and Zafar, S. M.(1965), "A study of the shear strength of saturated sand, and sand/clay mixtures, in triaxial compression", *Proc. 2nd Australia New Zealand Conf. SAFE.* pp.7-16.

(접수일자 2002. 12. 26, 심사완료일 2003. 11. 21)