

폐기물을 포함한 이중혼합토의 강도·변형특성

Strength and Deformation Characteristic of Two-Phase Mixture Soil

이기호*
Lee, Ki-Ho

Abstract

In order to utilize mass of oyster shells for a partial substitute material for reclamation, the shear characteristics of two-phase mixture soil with oyster shells were investigated with \overline{CU} test. From various experiments, it was found that the increase of mixed ratio of oyster shells causes the shear strength of mixed soil. And this phenomenon not only depends on friction due to confining pressure such as pure clay but also is influenced by shaping skeleton of oyster shells. Also, it was discovered that there were many influences by clay-oyster shell mixture from the study of the secant modulus and dilatancy characteristics of mixed soil. In addition, variation of oyster shell skeleton during shearing stage is examined applying modifying coefficient concept.

keywords : two-phase mixture soil, oyster shells, strength, deformation, skeleton.

요 지

굴폐각을 혼합한 해성점토를 매립재료로 활용하기 위한 기초자료를 얻기 위해 삼축실험을 실시하여 혼합토의 전단·변형 특성을 검토했다. 일련의 실험을 통해, 굴폐각의 혼합율이 증가하면 이중혼합토의 강도가 증가한다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 이러한 강도개선 효과는 순수점토와 같이 구속압에 기인한 마찰력뿐만 아니라, 굴폐각의 골격 구조 및 형성과정에 의해서도 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 혼합토의 활선탄성계수 및 다일러턴시 특성으로부터 굴폐각 혼합에 의해 나타나는 영향을 파악하였고 보정계수의 개념을 도입해 전단과정의 굴폐각 골격구조의 변화를 고찰했다.

주요어 : 이중혼합토, 굴폐각, 강도, 변형, 골격구조

1. 서 론

해류나 파랑이 비교적 거세지 않은 항내에서는, 하천 또

는 다른 해역으로부터 운반되어온 미립자가 침전되어 연약 지반이 형성된다. 이러한 연약지반은 항로를 매설하고 항만수역의 오염원으로서 심각한 환경오염의 원인이 된다. 이러한 문제의 개선책으로써, 연약지반은 정기적으로 준설되어 폐기·매립된다(喜田大三, 1978). 그러나, 준설점

* 정회원·공학박사, 서울대학교 지반환경연구실 Post-Dr.

토를 활용해 매립지를 조성할 경우, 점토가 불투수성 재료에 가까운 투수특성을 보이기 때문에 매립지가 안정될 때까지는 상당한 시간이 필요하게 된다. 따라서, 이러한 점토의 압밀을 단기간에 종료시키기 위해 어렵게 폐기물인 파쇄한 굴폐각을 활용했다.

굴폐각은 어렵 폐기물로 다량으로 방치되어져 있고, 악취의 발생원이 되어 그 유효활용방법의 개발이 절실히 요구되고 있다. 현재 굴폐각은 굴채묘 및 비료의 원료로 사용되고, 지반분야에서는 SCP (sand compaction pile) 공법에서 샌드 파일재로 모래와 혼합하여 사용되고 있지만, 그 활용량이 극히 제한적이기 때문에 다량의 굴폐각을 안정적으로 활용하기 위해 준설향토와 혼합하여 직접 매립하는 방법을 상정(想定)했다.

굴폐각에 의한 준설향토의 배수축진 효과는 압밀 실험과 수치해석을 통해 확인·보고한 바 있다(李基豪 등, 2000 ; Lee et al., 2000). 그러므로, 본 논문에서는 압밀이 종료한 혼합토의 변형·강도특성과 굴폐각의 골격구조가 점토의 역학특성에 미치는 영향을 평가했다. 본 논문에서는 삼축압축실험에 의해 혼합토의 강도·변형특성을 검토하고, 굴폐각 골격구조가 기질부분(점토)에 미치는 영향을 할선탄성계수와 다이러턴시 특성으로부터 평가하고 굴폐각을 매립재료로써 활용하기 위한 기초 자료를 얻는 것을 목적으로 한다. 특히 굴폐각을 포함한 혼합토의 강도, 변형 특성이 순수 점토의 특성과 어떠한 점이 다른가를 중심으로 검토했다.

2. 혼합토의 전단·변형특성

2.1 실험재료

삼축실험에 사용한 점토는 일본 미야기현의 시오가마항에서 준설향된 것으로, 자연함수비는 90%이고, 입도분포는 silt분이 52.5%로 가장 많이 분포되어있다.

굴폐각은 삼축실험의 공시체크기의 제약 때문에 2 ~ 9.5mm 범위에 분포하도록 파쇄했다. 파쇄한 굴폐각은 박편화되는 경향이 있고 입자는 타원형의 형태를 나타낸다. 또한, 파쇄한 굴폐각 입자에 통과시킨 배출수의 수질 실험을 실시한 결과 환경에 유해한 화학성분이 발견되지 않아 매립재료로서의 활용에 문제가 되지 않는다고 판단된다(建設省東北地方建設局東北技術事務所, 2000).

표 1은 실험재료의 물리적 특성을 정리한 것이다. 혼합한 굴폐각의 비율은 점토의 건조중량을 기준으로 0, 20, 40, 60, 80%의 5종류를 제작했다. 그 이유는 압밀응력과 굴폐각 혼합비율에 의해, 굴폐각 혼합토의 골격구조의 차가 발생하고, 이것에 의해 혼합토의 강도·변형특성도 다른 경향을 나타낼 것이라고 판단됐기 때문이다.

표 1. 실험재료의 물리적 성질

실험항목		점토	굴폐각
토립자밀도(g/cm ³)		2.538	2.430
액성한계 (%)		87	—
소성한계 (%)		33	—
소성지수 (%)		54	—
최대간극비		—	0.809
최소간극비		—	0.693
입도 구성 (%)	점토	28.0	(2.0~9.5) mm
	실트	52.5	
	모래	16.5	
	자갈	3.0	

또한, 선행압밀응력은 매립고가 5~15m정도의 상재하중에 상당하도록 49kPa과 98kPa의 2종류를 사용했다. 그 이유는 상재하중의 차이에 의해 굴폐각의 골격구조가 변화하고, 이러한 변화특성이 혼합토의 강도·변형특성에 영향을 미칠 것이라고 판단되었기 때문이다.

2.2 실험방법

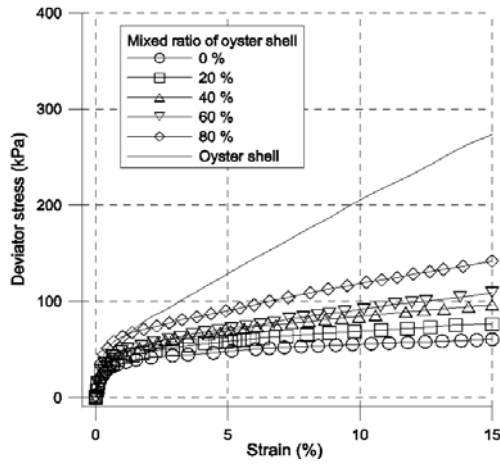
삼축압축실험의 조건은 등방압밀비배수 ($\bar{C}U$) 실험이고, 삼축셀 내에 공시체를 자립시킬 때의 등방압밀은 19.6 kPa, 재하속도는 0.5%/min를 사용했다. 삼축실험장치는 유압에 의해 제어되고 정적 및 동적실험이 가능한 실험장치이며 또한 공시체 크기는 직경이 100mm, 높이가 200mm이다. 삼축실험과정에 있어서의 재하방법은 공시체 하부를 고정된 상태에서 공시체 상부가 상하동(上下動)하도록 재하했다. 간극수압계는 공시체 상하부 2곳에서 측정되도록 설치했다.

2.3 삼축실험의 결과

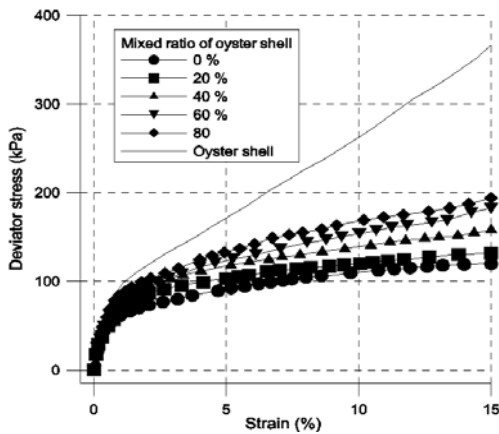
2.3.1 응력-변형관계

그림 1은 선행압밀응력 49kPa 과 98kPa의 삼축압축실

힘으로부터 구한 점토, 굴폐각 그리고 혼합토의 응력-변형 관계를 나타낸다. 혼합토와 점토의 곡선을 비교하면, 굴폐각 혼합율이 증가하면 동일한 축변형에서 축차 응력도 증



(a) 49 kPa



(b) 98 kPa

그림 1. 축차응력-변형률 관계

가하는 것을 알 수 있다. 또한, 굴폐각만의 응력-변형관계의 변화경향도 점토 및 혼합토의 변화경향과 유사하지만, 굴폐각만의 전단강도는 점토보다 수배 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

또한, 그림 2는 선행압밀응력의 차이가 혼합토의 응력-변형 관계에 미치는 영향을 조사하기 위해 선행압밀응력으로 정규화한 응력-변형관계를 나타냈다. 점토의 응력-변형관계를 정규화한 경우에는 하나의 선으로 표현된다. 그러나, 굴폐각 및 혼합토의 경우는 선행압밀응력이 작은 경우가 전단응력비가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

이 관계로부터 굴폐각을 포함한 혼합토는 선행압밀응력

에 기인하는 구속압에 의해 지배되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 굴폐각 입자에 의해 형성되는 골격구

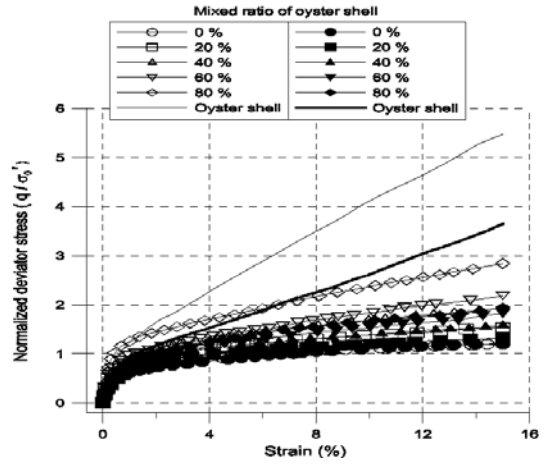
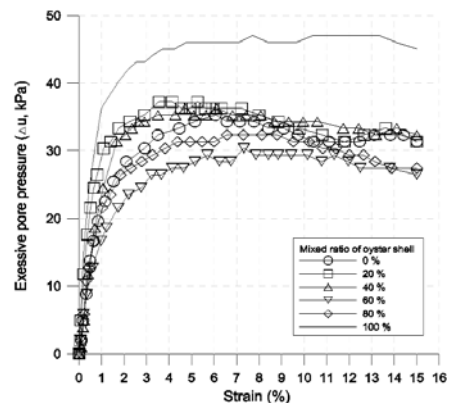


그림 2. 정규화된 축차응력-변형률 관계

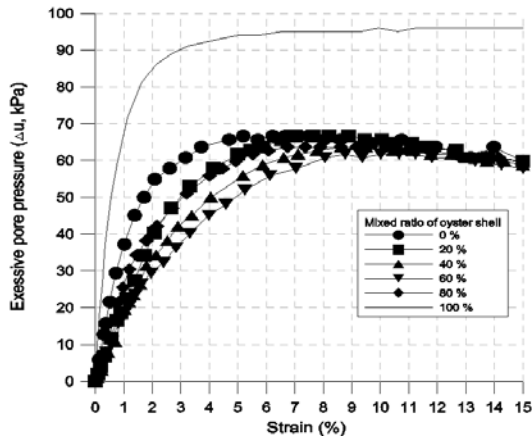
조에 기인하는 인터로킹(interlocking)효과 또는 굴폐각과 점토입자 사이의 마찰 등의 영향으로 판단된다. 또한 이 결과를 공학적 관점으로 판단하면, 준설점토를 굴폐각 입자와 혼합해 매립할 경우 매립심도가 얇은 지반일수록, 굴폐각 혼합에 의한 전단강도의 증대효과를 기대할 수 있는 것을 알 수 있다.

2.3.2 간극수압-변형관계

그림 3은 선행압밀응력 49kPa와 98kPa에서의 과잉간극수압-변형관계를 나타낸 것이다. 혼합토 및 점토의 과잉간극수압의 최대치는 축변형 4% 부근에서 나타나나, 혼합율에 의한 일관성은 발견할 수 없다. 선행압밀응력 49kPa에서 점토의 최대과잉간극수압과 혼합토의 과잉간극수압을 비교하면, 20%, 40%의 경우는 점토보다 큰 과



(a) 49 kPa



(b) 98 kPa

그림 3. 과잉간극수압변형을 관계

잉간극수압이 발생한다. 이 원인은 굴패각 혼합율이 작은 경우, 혼합토의 다일러턴시 특성은 기질부분(matrix part)의 특성에 지배되는 것으로 판단된다. 혼합토 내의 점토는 순수점토가 받는 압밀응력보다 작게 받음에도 불구하고 동일한 전단 변형의 경우, 발생하는 과잉간극수압은 순수점토보다 오히려 크게 나타난다. 이것은 굴패각의 비율이 작고 상당히 느슨한 구조를 갖고 있기 때문에, 부(負)다일러턴시 특성에 의한 것이라고 판단된다.

한편, 굴패각 혼합율 60%와 80%는 혼합토내의 점토가 분담해 받는 압밀응력이 더욱 작아지기 때문에, 발생하는 과잉간극수압도 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, 60%에서 가장 작은 수압이 발생하는 것으로 보아 혼합율 60%에서 수압이 가장 발생하기 어려운 골격구조를 형성하고 있음을 추측할 수 있다. 따라서, 굴패각의 비율을 60%보다 더욱 증가시킨 경우에도 간극수압의 발생량이 작게 되지 않는 것을 알 수 있다.

선행압밀응력 98kPa의 간극수압-변형관계에서는 최대 간극수압이 49kPa의 경우보다 큰 축변형율에서 나타남과 동시에, 점토만의 최대 과잉 간극 수압의 발생량이 가장 큰 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 혼합토의 부다일러턴시 특성이 49kPa보다 98kPa가 작게 되기 때문이라고 판단된다. 그러나, 혼합율에 의해 최대 과잉간극수압의 발생 경향은 49kPa의 경우와 같은 경향을 보인다. 또한 축변형이 8%를 넘으면, 과잉간극수압 곡선이 혼합비율에 의존하지 않고 압밀응력 49kPa의 곡선보다 좁은 범위에 분포하고

있는 것으로부터 전단과정시 구조변화가 작고 안정되어 있는 것이라고 판단된다.

그림 4는 선행압밀응력의 차이가 혼합토 및 점토의 강도·변형특성에 미치는 영향을 확인하기 위해, 간극수압-변형관계를 예압밀응력으로 정규화한 것을 나타냈다. 그 결과, 축변형 4%부근까지의 최대 간극수압비는 선행압밀응력 49kPa가 98kPa의 경우보다 큰 값을 나타내고 있음과 동시에 49kPa경우는 변형이 증가해도 수압의 차가 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서, 49kPa 경우는 굴패각에 의해 전단과정중에 그 구조가 크게 변화하고 있는 것에 반해, 98kPa의 경우는 선행압밀응력에 의해 발생하는 마찰력이 다일러턴시 특성에 지배적인 영향을 미쳤다고 판단된다.

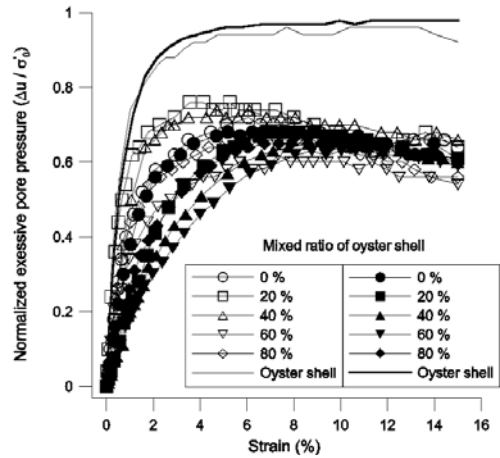


그림 4. 정규화된 간극수압변형을 관계

그림 5는 축변형 4%에서 발생한 간극수압비와 초기간극비와의 관계를 나타낸 것이다.

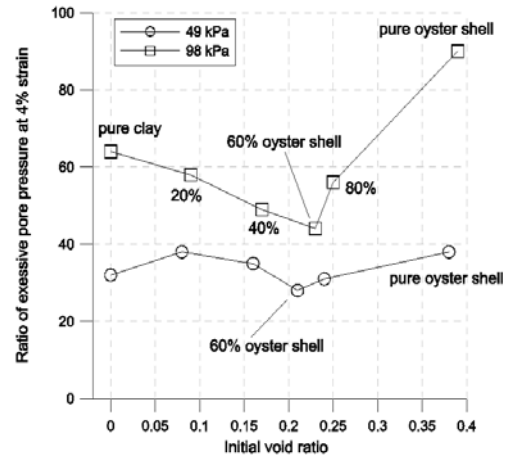


그림 5. 간극비와 간극수압비

굴패각의 골격구조가 혼합토의 간극수압의 발생특성에 미치는 영향을 정량적으로 판단하기 위해 체적비로 표현했다. 49kPa의 경우 혼합율 60%까지는 간극수압비가 조금씩 증가하다가 혼합율 60%가 되면 최소치를 나타낸다. 그러나, 그 혼합율을 초과하면 다시 증가한다. 98kPa의 경우, 혼합율 60%까지는 간극수압비가 선형적으로 감소하나 그 혼합율을 초과하면 다시 증가한다. 이와같은 거동으로부터, 선행압밀응력의 크기에 관계없이 혼합율 60%에서 부다일러턴시 특성이 가장 나타나기 어려운 구조가 되어있음을 알 수 있다.

3. 골격구조의 변화특성의 검토

혼합토의 할선탄성계수 및 다일러턴시 특성을 점토와 굴패각의 변화특성으로부터 설명하고 각각의 보정계수 α 와 β 의 개념을 제안해 전단과정의 굴패각 골격구조의 변화를 고찰했다.

3.1 할선 탄성계수에 의한 평가

임의의 변형 γ 에서의 혼합토의 축차 응력 $q_m(\gamma)$ 이 실험으로부터 얻어진 기질 부분(점토)의 축차 응력 $q_c(\gamma)$ 와 실험으로부터 얻어진 굴패각만의 $q_o(\gamma)$ 의 합(和)으로 표현되어, 이것들의 비율이 구성 체적비가 된다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$q_m(\gamma) = (1 - n_v) q_c(\gamma) + n_v q_o(\gamma) \quad \text{식(1)}$$

여기에서, 첨자 m, c, o는 각각 혼합토, 점토, 굴패각의 속성을 나타내며, n_v 는 굴패각의 체적 함유율을 의미한다. 그러나, 혼합토 내의 굴패각 구조는 굴패각만이 존재하는 경우에 형성되는 구조와 다르고, 그 영향이 반드시 체적비에 비례한다고 말할 수 없으므로 식(1)은 일반적으로 성립하지 않는다.

따라서, 이것을 보정하는 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 를 도입한다. 즉, 임의 변형 γ 에서 할선탄성계수 $E(\gamma) = q(\gamma)/\gamma$ 라고 정의하고, 이 보정계수를 이용하는 것에 의해, 식(1)은 할선탄성계수의 관계로써 다음과 같이 표현된다.

$$E_m = (1 - n_v) E_c(\gamma) + n_v \{ \alpha(\gamma) E_o(\gamma) \} \quad \text{식(2)}$$

식(2)에서 미지의 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 에 대해서 정리하면, 다음 식이 얻어진다.

$$\alpha(\gamma) = \frac{E_m - (1 - n_v) E_c(\gamma)}{n_v E_o(\gamma)} \quad \text{식(3)}$$

이렇게 해서 얻어진 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 의 값이 클수록, 혼합토의 할선탄성계수에 미치는 굴패각 구조의 역할이 큰 것을 의미한다. 그림 6은 이와같은 개념을 개략적으로 나타낸 것이다. 그림 7은 축변형의 진행에 의해 나타나는 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보정계수는 축변형 증가에 의해 초기에는 크게 변화하고 그 후에

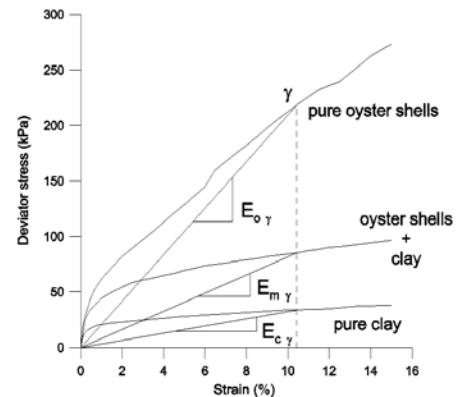


그림 6. 순수굴패각, 굴패각-점토혼합물, 순수점토의 할선탄성계수 산정방법

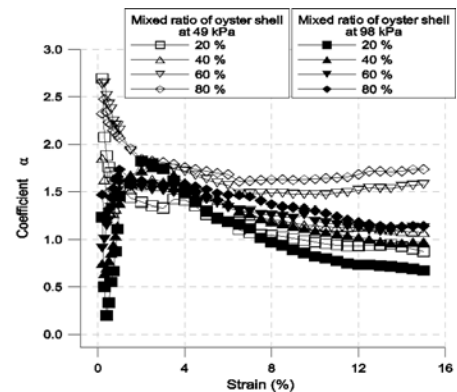


그림 7. 보정계수 α 와 변형률과의 관계

는 조금씩 감소하는 완만한 변화 특성을 나타내고 있다. 이것은 전단에 따른 굴패각의 변화구조가 발생하고 있는 것을 시사하고 있다. 또한 49kPa과 98kPa의 경우에서, 변형이 작은 경우에 특징적인 차이를 나타낸다. 49kPa의 경우는 축변형이 1% 이하에서 보정계수가 크게 증가하는 특징을 나타내고, 반대로 98kPa의 경우에는 49kPa의 경우보다 작은 값을 나타내고 있다. 즉, 이 결과는 49kPa의 경우에는 변형이 1%이하인 경우, 굴패각의 골격구조가 그 체적비율에 비례해서 혼합토의 활선탄성계수에 대해 커다란 영향을 미치고, 98kPa의 경우는 골격구조가 미치는 영향이 작은 것을 의미한다. 따라서, 전단초기에는 압밀응력 49kPa의 경우가 체적비에 비례해서 굴패각 입자들의 골격구조가 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 압밀응력이 큰 경우일수록 굴패각 입자에 의한 하중전달효과는 작다는 것을 의미한다고 분석될 수 있다.

3.2 다일러턴시특성에 의한 평가

혼합토의 다일러턴시 특성은 실험에서 구한 간극수압-축 변형의 관계에 의해 설명할 수 있다. 임의의 변형 γ 에서 혼합토의 과잉간극수압 $\Delta u_m(\gamma)$ 이 기질부분(점토)의 과잉간극수압 $\Delta u_c(\gamma)$ 와 굴패각의 과잉간극수압 $\Delta u_o(\gamma)$ 의 합으로 나타내어지고, 이것들의 비율이 구성체적비가 된다고 가정하면, 다음의 식이 성립한다.

$$\Delta u_m(\gamma) = (1 - n_v) \Delta u_c(\gamma) + n_v \Delta u_o(\gamma) \quad \text{식(4)}$$

그러나, 혼합토내의 굴패각 구조는 굴패각만의 경우에 형성되는 구조와 다르고, 그 영향도가 체적비에 비례한다고는 할 수 없으므로 식(4)는 일반적으로 성립하지 않는다. 따라서, 이것을 보정하는 보정계수 $\beta(\gamma)$ 을 도입한다.

$$\Delta u_m(\gamma) = (1 - n_v) \Delta u_c(\gamma) + n_v \{ \beta(\gamma) \Delta u_o(\gamma) \} \quad \text{식(5)}$$

식(5)를 보정계수 $\beta(\gamma)$ 에 대해서 정리하면, 다음의 식이 얻어진다.

$$\beta(\gamma) = \frac{\Delta u_m(\gamma) - (1 - n_v) \Delta u_c(\gamma)}{n_v \Delta u_o(\gamma)} \quad \text{식(6)}$$

이렇게 해서 얻어진 보정계수 $\beta(\gamma)$ 가 크면 클수록, 굴패각 구조가 혼합토의 다일러턴시 특성에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다. 그림 8은 간극수압-축변형의 관계에 의한 개념을 개략적으로 나타낸 것이다. 그림 9는 혼합토의 변형이 증가함에 따른 보정계수 $\beta(\gamma)$ 의 변화를 나타내고 있다. 그림으로부터, 49kPa과 98kPa의 변형이 작은 경우에서 보정계수의 대소관계는, 활선탄성계수와 같은 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 49kPa의 경우에는 전단과 함께, 굴패각 구조가 혼합토의 다일러턴시 특성에 미치는 영향이 단순히 작게 됨을 알 수 있지만, 98kPa의 경우에는 변형율 2.5%부근에서 최대치를 나타내고 그 변형율보다 증가하면 오히려 작아짐을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 압밀응력이 작은 49kPa의 경우에는 전단과 함께 굴패각의 골격구조가 수축되어 가는 느슨한 구조를 나타내고 있는데 반해, 98kPa의 경우에는 굴패각 구조가 일단 팽창하고 그 후 수축하는 조밀한 구조의 특징을 나타내고 있음을 알 수 있다.

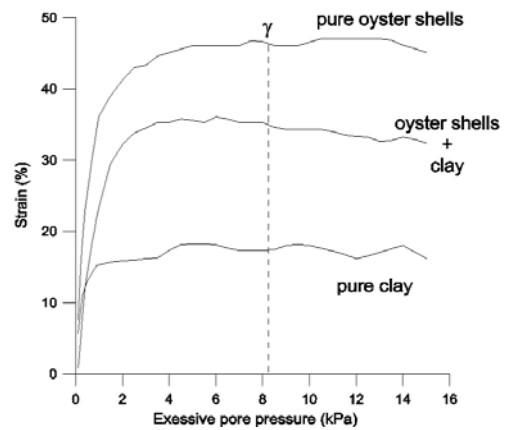


그림 8. 순수 굴패각, 굴패각-점토 혼합물, 순수점토의 변형율-과잉간극수압의 관계

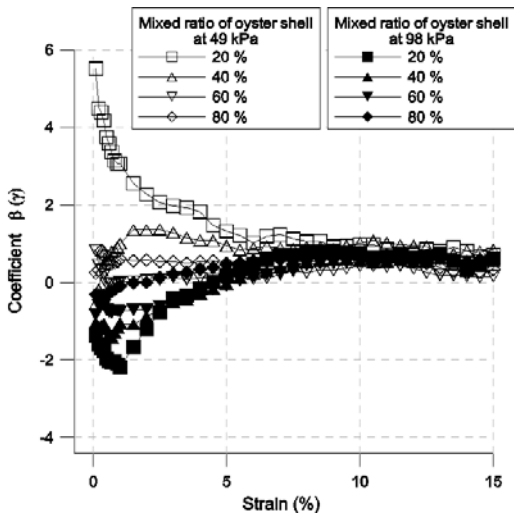


그림 9. 보정계수 β 와 변형율과의 관계

4. 결론

(1) 삼축압축실험에 의해, 굴패각 혼합에 의한 점토의 강도증가 특성을 평가하였다. 그 결과, 순수한 점토와 비교해서 굴패각 혼합율이 증가함에 따라 혼합토의 강도도 증가하는 것을 알 수 있다.

(2) 굴패각 혼합에 의한 강도개선 효과는 선행압밀응력이 작은 49kPa에서 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 혼합토의 전단강도 발현 메커니즘이 보통 흙과 같이

구속압에 기인한 마찰력에만 의존하지 않는다는 것을 의미한다. 그리고, 이 결과를 공학적으로 판단하면, 준설점토를 굴패각과 혼합해서 매립할 경우, 얇은 지반일수록 혼합에 의한 전단강도의 증가효과를 기대할 수 있음을 의미한다.

(3) 압밀비배수 전단으로 굴패각 혼합토에서 발생한 간극수압-변형관계를 검토했다. 최대 간극수압비는 선행압밀 응력 49kPa의 경우가 98kPa보다 큰 값을 나타냄과 동시에, 축변형이 진행된 후에도 굴패각 혼합율에 의한 간극수압 발생량의 차가 나타났다. 이것으로 49kPa의 경우가 98kPa보다 굴패각의 혼합에 의한 부다일러턴시가 크게 나타나고, 전단과 정중의 구조도 크게 변화하는 것을 시사하고 있음을 알 수 있다.

(4) 혼합토의 할선탄성계수 및 다일러턴시 특성을 점토와 굴패각의 변화특성으로부터 설명하고 각각의 보정계수의 개념을 도입해 전단과정의 굴패각 골격구조의 변화를 고찰했다. 압밀응력이 작은 49kPa의 경우에는 전단과 함께 굴패각의 골격구조가 수축되어 가는 느슨한 구조를 나타내고 있는데 반해, 98kPa의 경우에는 굴패각 구조가 일단 팽창하고 그 후 수축하는 조밀한 구조의 특징을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이에 따라, 98kPa의 경우는 선행 압밀응력에 의해 형성된 굴패각의 골격구조가 혼합토의 다일러턴시 특성에 미치는 영향이 49kPa보다는 작다는 것을 알 수 있다. (접수일자 : 2001. 5. 7.)

참 고 문 헌

1. カキ殻のサンドマット材への適用に関するフィールド実験報告書(2000), 建設省東北地方建設局東北技術事務所.
2. 李基豪, 風間基樹, 寺田賢二郎, 柳澤榮司 (2000), 破碎されたカキ殻を含む浚渫土の透水特性, 土木學會論文集, No.652/III-5, pp. 245~256.
3. 喜田大三(1978), ヘドロの浚渫 理分, 土と基礎, Vol. 26, No. 1, pp. 55~61.
4. Lee, K. H., Kazama, M., Terada, K. and Yanagisawa, E.(2000), Permeability characteristics of dredged sludges mixed with crushed oyster shells, Pro-ceedings of the international symposium on coastal geotechnical engineering, Is-Yokohama, pp. 63~66.