

폐기물을 포함한 혼합토의 특성 및 지반공학분야에의 응용

Characterization of the mixed soil with waste and application to geotechnical field

이기호, Kiho-Lee

서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후 과정,
Post doctor School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.

SYNOPSIS : In order to utilize mass of oyster shells for a partial substitute material for reclamation, we investigate the shear characteristics of dredged sludge mixed with oyster shells. the apparent modulus of elasticity of the this mixture are obtained from the triaxial compression tests and is utilized to characterize the apparent modulus of elastic of the oyster shells by carrying out some numerical analysis based upon the homogenization theory. We got the conclusion by a series of experiment, 1) It is verified that modulus of elasticity of dredged clay is improved by mixing with oyster shells. 2) The homogenization method for deducing apparent modulus of elasticity of oyster shells, which can consider micro-structure of mixed soil, is introduced. The elastic modulus is affected from the skeleton structure of oyster shell. The effect of 49kPa is bigger than that of 98kPa.

Keywords : wastes, mixed soil, oyster shell, homogenization method, triaxial compression test

1. 서론

본 논문에서는 굴폐각을 안정적으로 활용하기 위한 방법의 하나로써 굴폐각을 준설풀토와 혼합하여 매립하는 현장을 상정했다. 모래와 점토로 이루어진 전형적인 혼합토와 같이 굴폐각과 준설풀토로 구성된 혼합토는 역학특성의 규명에 있어서 불분명한 부분이 아직 많이 남아있다. 저자는 굴폐각을 포함한 혼합토의 압밀·투수특성에 관한 연구결과를 보고한바 있다(李基豪,2000)

본 연구에서는 굴폐각 혼합토를 지반재료로서 활용하기 위한 비배수 강도·변형특성을 실험적으로 검토한 결과를 보고한다. 또한, 혼합토의 미시구조에 주목해 공시체 스케일의 비균질성을 고려할 수 있는 균질화법(Babuska, 1976)에 의해 굴폐각이 점토의 강도·변형특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가했다.

혼합토의 역학특성에 관한 연구는 실험적 연구와 이론·해석적 연구로 크게 구별될 수 있다. 먼저, 실험적 연구는, 주로 점토와 모래로 구성된 혼합토에 관한 연구에 집중되어져 왔다. Trollope(1965)는 사질토와 점성토로 구성된 혼합토의 배수삼축실험의 결과로부터, 점성토와 사질토의 경계를 나타내는 세립분함유율이 존재하는 것을 보고하고 있다. 또한 Hukue(1986)는 세립분함유율이 감소하고 조립자끼리의 골격이 형성되면 혼합토의 압축특성이 크게 변화하는 것에 착안해, 혼합토안에서 조립자끼리 완전한 골격구조를 형성하는 경우와 형성하지 않는 경우의 2가지 상태로 분류하고, 이때의 경계를 나타내는 간극비에 의해 혼합토의 역학적 특성을 평가하는 기법을 제안하고 있다. Skempton(1985)은 점토와 이암(泥岩)으로 구성된 혼합토의 잔류강도와 점토함유율과의 관계를 구하고, 점토함유율이 20%이하일 경우는 잔류강도에 거의 영향을 끼치지 않으나, 50%이상이면, 현저히 영향을 미치고, 모래와 벤토나이트의 혼합토에 대해서도 같은 결과가 나타남을 지적하고 있다. 또한 혼합토의 역학특성을 현장에서 간편한 실험장치로 규명하는 연구도 이루어지고 있다. Kumar and wood(1999)는 fall cone test에 의해 자갈과 점토로 구성된 혼합토의 역학특성을 검토했다. 그 결과, 점토함유율과 액성한계 및 비배수강도가 선형관계가 있고, fall cone test로부터 구한 체적비로부터 점토와 자갈의 특성을 나타내는 영역을 구별하는 것이 가능하다는 것을 밝혀냈다.

또한, 이론·해석적 연구는, 일반적으로 혼합체의 거시적인 역학특성의 연구에 거슬러 올라갈 수 있다. 불균질한 재료를 역학적으로 어떻게 취급할까 하는 문제는 오래 전부터 이론역학의 분야에서 연구되어져 왔다. 그 중에서 불균질한 재료의 거시적 역학거동을 미시적인 관점으로부터 예측하려는 연구가 주로 연구되어지고 있다. Eshlby(1957)는 무한탄성체 안에 변형계수가 다른 1개의 타원체 혼입재가 혼합됐을 때의 혼합체의 응력-변형관계를 평가하는 기법을 제안하고 있다. 혼합체의 체적비율이 비교적 높은 경우에도 적용할 수 있는 평균화 수법의 대부분이 Eshlby의 연구성과에 기초를 두고 있다. 또한, 미시구조의 형태에 의한 역학특성의 교란을 해석하기 위해 흔히 사용되는 「등가혼입재」도 Esheby의 연구성과에 기초를 두고 있다. 그리고, 가장 중요한 점은 기질부분과 혼입재, 혼입재 상호간의 작용을 어떻게 고려하느냐에 있다. 이 상호작용을 근사하는 방법은 Hill이 제안한 어떤 재료정수를 갖고 혼합체 안에, 1개 혼입재를 부가(付加)한 모델에 의한 self-consistent법, 상하계(上下界)산정법 등이 있다. 또한, 大嶺(1993)등은 모래와 점토로 구성된 혼합토의 강도특성을 각각의 구성요소 및 재료특성으로 부터 예측하는 기법을 제안했다. 이것은, 혼합토 내부의 응력분담을 혼입재와 기질부분(세립자 및 간극수로 구성되는 부분)으로 나누고, 단위체적당 가상 일의 양은 같다고 가정함으로써 응력분담을 산출하고 이 결과를 근거로 혼합토의 일차원 압축문제에 적용하고 있다.

최근에는, 거시적 및 미시적 고찰을 동시에 실행할 수 있는 점근전개법을 근간으로한 균질화이론을 활용해서 혼합토의 역학특성을 파악하려는 연구(Lee et al.,2000)가 시도되고 있다. 본 논문에서도 이중(二種)혼합토의 강도·변형특성을 규명하기 위해 균질화법을 도입하여 실험결과를 분석하였다.

2. 삼축압축실험

2.1 혼합토의 공시체 작성

굴폐각 혼합토는 간극수, 점토 토립자, 굴폐각 입자로 구성되어 있다. 본 논문에서는 고체부분을 굴폐각과 점토 토립자로 구분해서 취급했다. 이 때문에 일반적으로 흙의 고체부분에 해당하는 토립자와 간극수의 질량비 관계로 표현하는 함수비의 개념은 사용하기 어렵다. 왜냐하면, 동일한 초기함수비를 갖는 점토에 다른 양의 굴폐각을 혼합시킨 경우, 굴폐각을 토립자에 포함시켜 함수비를 계산하는 경우, 그리고 굴폐각을 포함시키지 않는 경우는 다르게 표현되기 때문이다. 혼합토의 체적은, 아래 식과 같이 각각의 구성요소의 중량(w)과 단위체적중량(v)의 관계로 표현될 수 있다.

$$V = \frac{W_o}{\gamma_o} + \frac{W_s}{\gamma_s} + \frac{W_w}{\gamma_s} \quad (1)$$

여기에서, 첨자 o, s, w는 각각 굴폐각, 기질부분의 점토입자, 간극수의 속성을 나타낸다. 또한, 굴폐각의 혼합을 R은 점토입자에 대한 중량비로써

$$R = \frac{W_o}{W_s} \times 100 \quad (2)$$

와 같이 정의된다. 이하 실험결과는 위와 같은 혼합율을 사용하여 나타내지만 혼합체이론에서는 구성요소의 체적율로서도 표현 되어지고 있다. 때문에, 상술한 정의외에도 압밀종료 후의 혼합토내에 차지하는 굴폐각의 체적비율을 다음과 같이 정의한다.

$$n_v = \frac{V_o}{V_e} \quad (3)$$

여기에서, V_e 는 기질부분과 굴폐각의 체적, V_o 은 굴폐각의 체적을 나타낸다. 이와 같이, 체적비를 정의한 것은 같은양의 굴폐각을 함유한 혼합토이라도 다른 압밀응력으로 재하한 경우, 기질부분의 함수비의

차이에 의해 체적비도 다르게 나타나기 때문이다.

2.2 혼합토 제작방법

점토는 일본 미야기현의 시오가마항(塩釜港)에서 준설된 것이고, 입도분포는 실트분이 52.5%로 가장 많이 함유되어 있다. 점토는 해수(海水)로 함수비를 조절하면서 탈기했다.

굴패각은 압밀시험기의 몰드크기의 제약 때문에 2~9.5mm 범위에 분포하도록 파쇄하고, 입도분포가 균질하게 되도록 2~4.75mm의 범위에서 50%, 4.75~9.5mm에서 50%씩 혼합했다. 파쇄전의 굴패각의 원형은 길이 80~120mm, 폭 30~70mm, 두께 20~50mm이고, 파쇄후에는 박편이 되는 특징이 있다. 파쇄한 굴패각 입자층을 통과시킨 배출수의 수질 실험을 실시한 결과 환경에 유해한 화학성분이 검출되지 않아 매립재료로서의 활용에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 실험에 사용한 점토와 굴패각의 물리적 특성은 표 1에 정리하였다.

< 표-1 굴패각의 물리적 특성 >

		점토	굴패각
밀도(g/cm ³)		2.538	2.430
액성한계(%)		87	-
소성한계(%)		33	-
소성지수		54	-
최대 간극비		-	0.809
최소 간극비		-	0.693
입도분포(%)	clay	28.0	(2.0~9.5) mm
	silt	52.5	
	sand	16.5	
	gravel	3.0	

2.3 삼축시험의 방법

삼축시험장치는 유압에 의해 제어되고 정적 및 동적시험이 동시에 가능한 시험장치이다. 공시체의 크기는 직경이 100mm, 높이가 200mm이다. 재하방법은 공시체 하부를 고정된 상태에서 공시체 상부에서 재하하였다. 간극수압계는 공시체 상부 및 하부 2곳에서 측정되도록 제작하였다. 전단중 멤브레인이 파손될 수 있으므로 두께 0.4mm의 것을 사용했으나 3회중 1회는 축변형이 증가하면 파손됐다.

선행압밀을 종료한 공시체를 압밀몰드로부터 꺼내 삼축셀내에 설치하였다. 선행압밀응력은 49와 98kPa의 2종류를 사용하였다. 그 이유는, 본 실험에서는 매립지반이 받는 하중을 지중 5-15m정도의 상재하중을 받는 현장을 대상으로 했기 때문이다. 또한, 선행압밀하중을 변화시킨 것은 선행압밀응력과 굴패각의 혼합비율에 따라 굴패각 혼합토의 골격구조가 다르게 형성되기 때문에 혼합토의 강도·변형도 이 영향을 받아 다른 역학거동특성을 나타낼 것이라고 판단되었기 때문이다.

혼합한 굴패각의 비율은 점토의 건조중량을 기준으로 0, 20, 40, 60, 80%의 5종류를 제작하였다. 실험조건은 등방압밀비배수(\bar{c}_u)이며, 삼축셀에 공시체를 설치시 등방압밀은 19.6kPa, 전단속도는 0.5%/min로 약간 빠른 재하속도를 재하하였다.

2.4 실험결과

2.4.1 압밀과정에서의 공시체의 체적변화

표 2는 압밀전후의 기질부분의 간극비변화와 응력분담율과의 관계를 나타낸 것이다. 동일 압밀응력조건하에서도 굴패각의 혼합율이 증가하면 압밀응력의 일부를 굴패각의 골격구조가 나누어 분담하기 때문에 점토에 전체 압밀응력이 작용하지 않고 점토의 간극비도 크게되는 것을 알 수 있다.

점토만의 압밀실험으로부터 얻은 간극비-압밀응력 관계로부터 압밀에 유효하게 작용하는 압밀응력을 산출하는 것이 가능하며, 혼합토에 작용하는 전응력중에서 기질점토가 어느정도의 하중을 부담하는지를 알 수 있다. 이를 응력분담율이라 정의했다. 20, 40%의 굴폐각의 혼합물에서는 압밀응력 49kpa보다 98kpa의 경우가 기질점토의 응력 분담율이 큰 것을 나타낸다. 이것은 20, 40%의 혼합물은 전단전의 시점에서 압밀응력이 작은 49kpa의 경우가 등방압밀응력을 굴폐각의 골격구조에서 분담해 받는 비율이 크다는 것을 의미한다.

표 2 간극비변화와 응력분담율의 관계

굴폐각 함량비(%)	압밀 후의 간극비		점토의 응력분담율	
	49kPa	98kPa	49kPa	98kPa
20	1.815	1.445	64	73
40	1.955	1.449	56	72
60	1.986	1.639	52	39
80	2.103	1.834	42	32

2.4.2 응력 -변형관계

혼합토의 전단변형을 서술하기 전에 혼합토내의 기질점토부분의 전단특성을 정리했다. 그림 1은 각각 선행압밀 응력이 49, 98kpa를 도입한 경우, 삼축실험으로 구한 점토, 굴폐각, 그리고 혼합토의 관계를 점토의 그것과 비교하면 굴폐각 혼합율이 증가하는 것에 의해 혼합토의 응력 -변형관계는 굴폐각의 특성에 접근함을 알 수 있다. 굴폐각만의 응력-변형관계는 점토 및 혼합토의 관계와 유사하지만 굴폐각만의 전단강도는 점토에 비해 수배 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 압밀응력의 크기가 혼합토의 응력-변형관계에 미치는 영향을 파악하기 위해 압밀응력으로 정규화한 응력-변형관계를 그림 2에서 정리했다. 점토의 응력-변형관계는 압밀응력으로 정규화 하면 하나의 선으로 표현되는 것을 잘 알려진 사실이다. 그러나, 굴폐각 및 혼합토의 경우는 압밀응력이 작은 경우(49kPa)가 축차응력이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이 관계로부터 굴폐각을 포함한 혼합토는 순수 점토와 달리 압밀응력으로 인한 구속압에 의해 발생하는 토립자의 마찰저항으로만 지배되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 혼합토의 응력-변형관계는 굴폐각 입자구조의 형성 정도에 영향을 받는다고 추론된다.

그림 3은 축변형15%에서의 혼합토와 점토의 축차응력의 차를 나타낸 것이다. 혼합토의 전단강도는 굴폐각의 혼합율이 증가하면 같이 증가하지만 그 증가폭은 압밀응력에 의존하지 않는다. 이 결과는 압밀응력이 작은 경우에도 축차응력의 차에는 변화가 없기 때문에 매립심도가 얇은 지반일수록 지반개량의 효과가 크다는 것을 알 수 있다. 그러나, 이 결과는 굴폐각의 골격구조가 전단강도에 미치는 영향이 굴폐각의 혼합율에만 영향을 받고 압밀응력에는 독립적인 것을 의미하는 것은 아니다. 전술한 바와 같이 굴폐각의 체적비율 및 기질점토의 간극비등의 차이의 요인도 영향을 미쳤을 것이다. 따라서, 혼합토의 전단강도는 단순히 압밀응력에만 비례하지 않고 굴폐각의 골격구조와 기질점토의 전단강도의 상호작용에 의해 결정되어 진다고 판단된다.

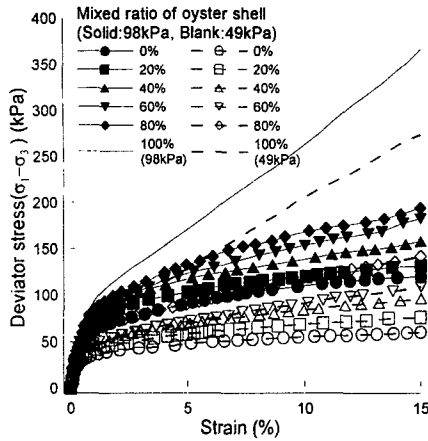


그림 1 선행압밀응력 49, 98kPa에서의 응력-변형 관계

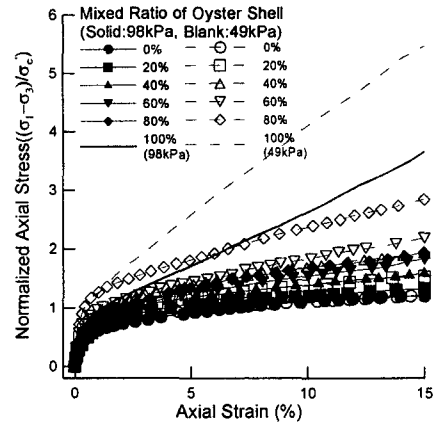


그림 2 정규화한 응력-변형 관계

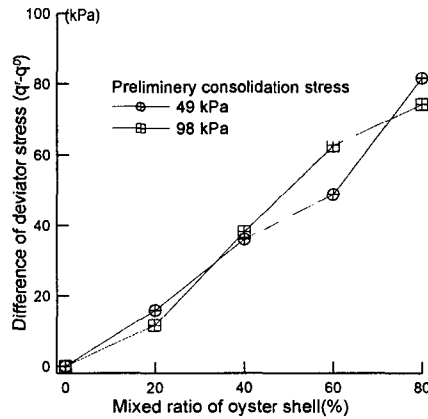


그림 3 축변형15%에서 혼합토와 점토의 축차응력의 차

2.4.3 과잉간극수압 -변형관계

그림 4는 압밀응력 49, 98kPa의 간극수압-변형관계이다. 그림 5는 간극수압-변형관계를 압밀응력으로 정규화한 것이다. 압밀응력이 작은 경우는 축변형 4%부근에서 과잉간극수압이 최대치를 나타내고 있다. 그러므로 그림 6에서 축변형이 4%에서의 과잉간극수압비와 굴폐각 체적비와의 관계를 정리했다. 그림 6 으로부터는 혼합율 및 체적비에 의한 일정한 증감특성은 확인되지 않았다.

먼저, 압밀응력49kPa, 축변형4%에서의 점토와 혼합토의 간극수압비를 비교하면 20, 40%에서는 순수점 토보다 혼합토의 간극수압 발생이 크다. 이 원인은 다음과 같이 추론할 수 있다. 혼합토의 간극수압 발생특성은 기질점토의 간극수압 발생특성에 지배되지만 기질점토는 순수점토가 받고 있는 압밀응력보다 작은 응력을 받고 있기 때문에 느슨한 구조를 갖고 있다. 따라서, 굴폐각 혼합율 20, 40%에서는 순수점 토보다 큰 부다일레이턴시를 받고 있다고 판단된다.

이러한 판단에 의하면, 혼합율이 더욱 높아진 경우(60%)는 기질점토가 받는 압밀응력이 더욱 작게되고 간극비도 작게되기 때문에 전단에 의해 발생하는 기질부분의 과잉간극수압은 크게 나타날 것이라 판단 할 수 있다. 그러나, 실험결과는 60%에서 최소치를 나타냈다. 이것은 혼합토의 또하나의 구성요소인 굴 폐각 골격구조의 수축특성이 혼합율이 증가함에 따라 작게되어졌다고 판단된다. 그러나, 60%에서 더욱 혼합율이 증가하면 간극수압이 같이 감소하지 않을 것은 명백하다. 왜냐하면 그림에서 순수굴폐각의 간 극수압 발생량은 혼합토보다 오히려 크게 나타났기 때문이다.

이상의 결과를 정리하면 20%에서 60%까지의 굴폐각 골격구조는 80%이상의 구조와 크게 다른 구조를 갖는다고 판단된다. 20%에서 60%까지의 골격구조는 굴폐각의 단부가 다른 굴폐각면에 접촉하는 구조인 데 반해, 80%에서는 굴폐각입자의 면과 면이 서로 접해있는 구조일 것으로 판단된다. 또한, 혼합토내의 굴폐각의 골격구조는 항상 순수 굴폐각의 골격구조에 대응하지 않는다는 것은 명백하다.

압밀응력 98kPa의 경우는 49kPa의 특성과 약간 다른 특성을 나타낸다. 최대간극수압이 나타나는 축변형은 49kPa보다 크게 되며 동시에, 과잉간극수압의 발생량은 순수한 점토 및 굴폐각의 경우가 그것을 혼합한 경우보다 큰 값을 나타낸다. 이것은 98kPa의 압밀응력을 받은 혼합토의 부다일레이션은 49kPa보다 작게 되는 것을 의미한다. 이 결과는 압밀응력이 큰 경우가 전단중의 혼합토의 구조변화가 작고 안정된 구조라는 것을 시사한다.

압밀응력으로 정규화한 간극수압-변형관계로부터 축변형 6%정도까지의 과잉간극수압비는 압밀응력 49kPa이 큰 값을 나타내고 있고 변형이 증가함에 따라 수압발생량의 차가 크다. 따라서, 49kPa의 경우는 전단중에 구조가 크게 변화하고 있다고 추론된다.

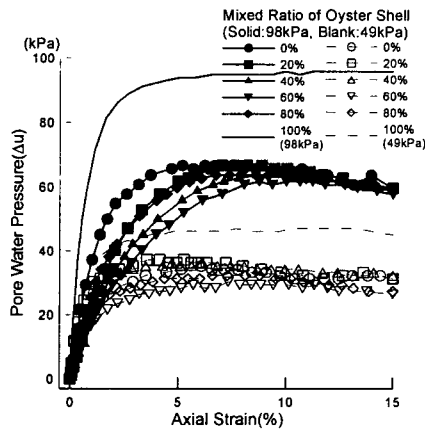


그림 4 선행압밀응력 49, 98kPa에서의 간극수압-변형 관계

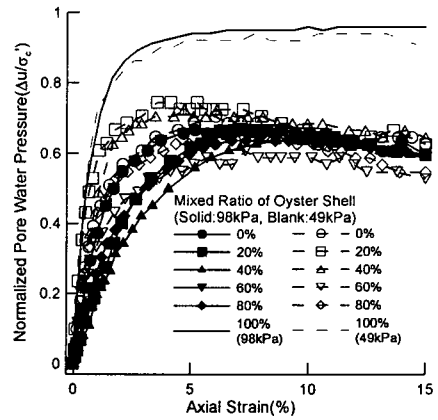


그림 5 정규화된 간극수압-변형 관계

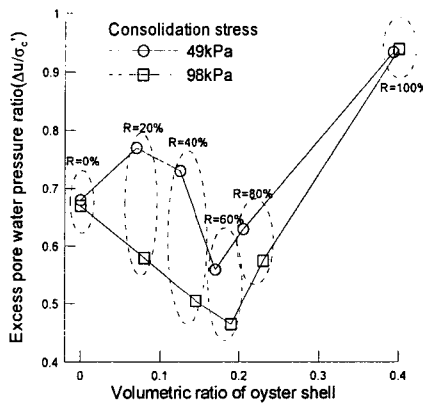


그림 6 축변형4%에서의 과잉간극수압비-굴폐각체적비 관계

2.4.4 유효응력경로

그림 7은 전단중의 유효응력을 나타낸 것이다. 그림으로부터 혼합토의 마찰각은 순수 굴폐각보다 작고 순수 점토의 마찰각보다는 약간 큰 경향을 나타낸다. 특징적인 것은 순수 점토 및 굴폐각과 비교해 혼합토는 전단초기에 유효평균주응력의 증가경향이 크고 변상시 유효평균주응력도 크게 증가한다. 변상시의 변형량을 비교하면 순수 점토 및 굴폐각의 약 2배를 나타낸다. 따라서 혼합토의 비배수 전단강도가 혼합토의 구성요소인 순수한 점토와 굴폐각의 평균적인 전단거동을 나타내지 않는 것은 혼합토의 다일레이션특성이 구성요소의 평균적인 특성을 나타내고 있지 않기 때문이다.

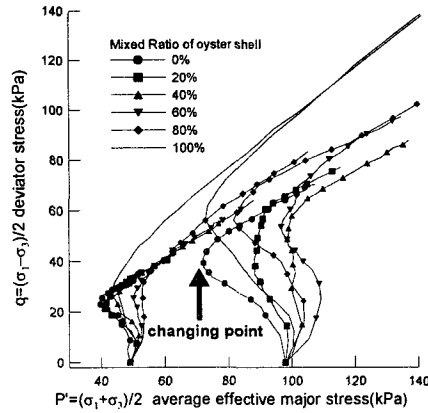


그림 7 유효응력경로

3. 혼합토의 할선변형계수 특성에 의한 굴패각 골격구조의 평가

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

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

$$q_m(\gamma) = (1 - n_v) q_c(\gamma) + n_v q_o(\gamma) \quad (4)$$

여기에서, m, c, o 는 각각 혼합토, 점토, 굴패각의 속성을 나타내며, n_v 는 굴패각의 체적 함유율을 의미한다. 그러나, 혼합토내의 굴패각 구조는 굴패각만이 존재하는 경우에 형성되는 구조와 다르고, 그 영향이 반드시 체적비에 비례한다고 단정할 수 없으므로 식 (4)는 일반적으로 성립하지 않는다. 따라서, 이것을 보정하는 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 를 도입한다. 즉, 임의의 변형 γ 에서 할선변형계수 $E(\gamma) = q(\gamma)/\gamma$ 라고 정의하고, 이 보정계수를 이용하는 것에 의해, 식 (4)은 할선변형계수의 관계로써 다음과 같이 표현된다.

$$E_m = (1 - n_v) E_c(\gamma) + n_v \{ \alpha(\gamma) E_o(\gamma) \} \quad (5)$$

식(5)에서 미지의 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 에 대해서 정리하면, 다음 식이 얻어진다.

$$\alpha(\gamma) = \frac{E_m - (1 - n_v) E_c(\gamma)}{n_v E_o(\gamma)} \quad (6)$$

이렇게 해서 얻어진 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 의 값이 클수록, 혼합토의 할선변형계수에 미치는 굴패각 구조의 역할이 큰 것을 의미한다. 그림 8은 축변형의 진행에 의해 나타나는 보정계수 $\alpha(\gamma)$ 의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보정계수는 축변형 증가에 의해 초기에는 크게 변화하고 그 후에는 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 체적비에 비례해서 혼합토의 할선변형계수에 대해 커다란 영향을 미치고, 98kPa의 경우는 골격구조가 미치는 영향이 작은 것을 의미한다. 따라서, 전단초기에는 압밀응력 49kPa의 경우가 체

적비에 비례해서 굴패각 입자들의 골격구조가 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 압밀응력이 큰 경우일수록 굴패각 입자에 의한 하중전달효과는 작다는 것을 의미한다고 분석될 수 있다.

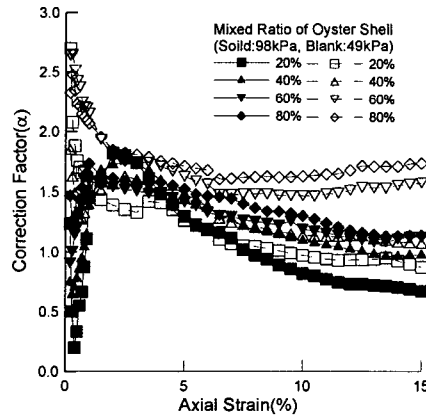


그림 8 축변형에 따른 보정계수(α)의 변화

4. 균질화법에 의한 혼합토의 강도·변형특성의 검토

기존의 많은 연구자들은 혼합토의 강도·변형특성을 파악하기 위해 혼합토를 대표할 수 있는 거시적 변형계수를 구하는 연구에 주목해 왔다. 그러나, 혼합토의 변형계수가 거시적인 강도·변형특성을 파악하는 중요한 변수이기는 하지만 미시구조의 변화에 기인한 특성까지 규명하기에는 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 삼축실험과 균질화이론을 조합한 새로운 기법을 제안하고, 그 기법에 의해 미시구조가 혼합토의 강도·변형특성에 미치는 영향을 검토하였다. 혼합토는 비선형적인 강도·변형특성을 나타낸다. 그러나 실험에서 얻어진 혼합토의 비선형성을 균질화 계산에 직접 적용하는 것은 용이하지 않다. 따라서, 본 수치해석에서는 해석상의 간략화를 위해 혼합토를 탄성체로 가정하고 해석을 수행하였다. 전단강도는 축변형 15%에서의 할선변형계수를 구하여 사용하였다. 아울러, 미소변형 상태에서의 특성을 검토하기 위한 방안으로 축변형 1%에서의 할선변형계수를 사용하였다. 해석에 사용한 기질점토와 혼합토의 할선변형계수를 표 3에 정리했다. 균질화이론에 관한 상세한 내용은 참고 문헌(Sanchez-palencia,1980; Terada,1996)을 참조할 수 있다.

<표-3> 할선변형계수

		굴패각 혼합토				순수 점토			
		49		98		49		98	
축변형(%)		1	15	1	15	1	15	1	15
굴패각 함량비(%)	20	0.420	0.052	0.675	0.089	0.240	0.030	0.540	0.059
	40	0.470	0.066	0.710	0.108	0.232	0.027	0.520	0.057
	60	0.500	0.074	0.790	0.124	0.218	0.026	0.290	0.033
	80	0.640	0.097	0.881	0.132	0.190	0.021	0.240	0.030

4.1 해석방법

굴패각 혼합토의 변형계수는 혼합토를 구성하는 굴패각과 기질부분의 변형계수 그리고 이들이 구성하는 골격구조로부터 결정된다. 따라서, 굴패각의 겉보기 변형계수를 산정하기 위해서는 혼합토의 미시구조와 각 구성요소의 변형계수가 필요하다. 이들 변형계수 중에서 굴패각의 변형계수를 직접 실험을 통

하여 산정하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 본 해석에서는 일단 점토의 변형계수, 혼합토의 미시구조, 그리고, 가정한 굴패각의 변형계수를 이용하여, 수치해석에 의해 혼합토의 변형계수를 산정하였다. 그 다음, 수치해석과 삼축실험으로부터 구한 각각의 혼합토의 변형계수가 서로 일치하도록 굴패각의 변형계수를 변화시켜가며 반복계산을 수행하였다. 최종적으로 얻어진 굴패각의 변형계수를 본 연구에서는 굴패각의 겉보기 변형계수로 정의하였다. 여기서 “겉보기”의 용어를 사용하는 이유는 실제의 3차원구조를 2차원구조의 계산 모델로 설명한 점, 해석상 탄성영역의 문제로서 취급한 점, 점토와 굴패각 경계에서의 역학변화를 고려하지 않은 점등 해석상의 제약이 있기 때문이다. 해석상에서 점토의 변형계수는 실제 점토가 부담해 받고 있는 응력을 고려해서 산정하였다. 굴패각의 혼합율이 증가하면 기질점토의 체적변화가 작아진다. 이것은 전술한 바와 같이 압밀응력의 일부를 굴패각 골격구조가 부담하기 때문이다. 한편, 혼합토의 변형계수는 삼축실험으로부터 구한 응력-변형관계로부터 구할 수 있다. 수치해석으로부터 산정되는 균질화 변형계수는 다음과 같이 구해진다.

$$E^H = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} & E_{xz} \\ & E_{yy} & E_{yz} \\ & & E_{zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

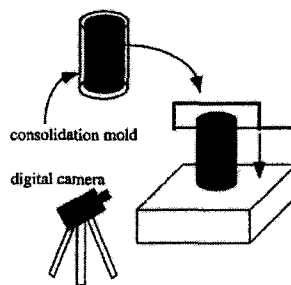
여기서, E^H 는 균질화 변형계수, E_{xx} 는 수평방향 변형계수, E_{yy} 는 상하방향 변형계수를 나타낸다. 삼축실험의 재하방향이 상하방향이기 때문에 실험에서 얻어지는 변형계수는 E_{yy} 에 해당된다. 즉, 매트릭스의 E_{yy} 와 삼축실험에서 구한 혼합토의 변형계수가 일치할 때까지 계산을 수행하였다.

4.2 미시구조의 모델화 및 해석조건

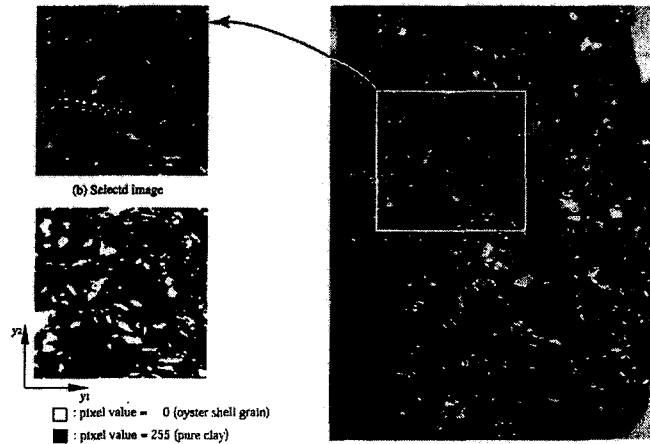
균질화해석에는 직교2차원으로 해석모델을 제작하였다. 이것은 3차원구조를 반영한 모델의 계산은, 현실점에서는 기술적 시간적 제약이 따르기 때문이다. 말하자면, 3차원구조를 정확히 형상화하는 것이 간단하지 않고, 재현했다 하더라도 오차를 포함한 해석모델의 범주를 벗어날 수 없다.

모델의 제작방법은 우선, 압밀이 종료한 공시체를 압밀몰드로부터 꺼내, 그 공시체를 와이어로 절단한 뒤, 그 종단면을 카메라로 촬영하여, 디지털영상을 얻는다. 공시체를 절단할 때는 굴 패각의 배열구조나 각도가 변화하지 않도록 약 5cm정도 상부로부터 절단하고, 그 절단부분으로부터 손으로 신중히 절단해 나갔다. 이러한 방법으로 얻은 디지털영상은 DIB-modeling 기법에 의해 모델화하였다(이기호, 2000).

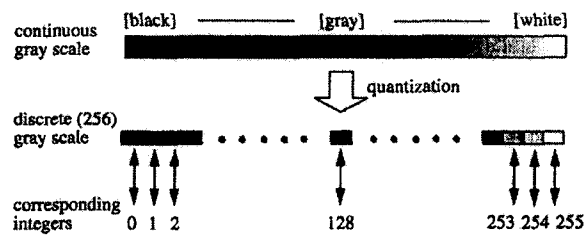
그림 9는 DIB-modeling기법에 의한 단위구조(Unit cell)의 제작방법을 나타낸 것이다. 모델제작은 단면 사진을 근거로 하여 미국보건기구의 NIH image program을 이용하여 그 단면을 디지털화하였다. 그리고, 각 구성재료의 분포비율에 의해 굴패각과 기질점토부분으로 분리한다(Thresholding). 이것을 Binary image로 계산에 이용하였다. 한편, 완성된 Binary data가 구성재료의 분포비율과 일치하지 않는 경우는, VFCHG program을 이용하여 조정하였다. Unit cell의 크기는 200 × 200 pixel(1 pixel이 1요소에 대응하는 유한요소)의 크기로 모델화(Terada, 1997)하였다. 그림 10은 수치해석에 사용한 Unit cell구조를 나타낸 것이다.



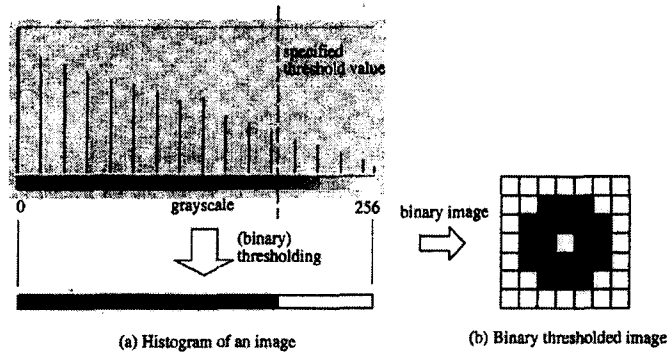
(a) Cutting



(b) Selecting

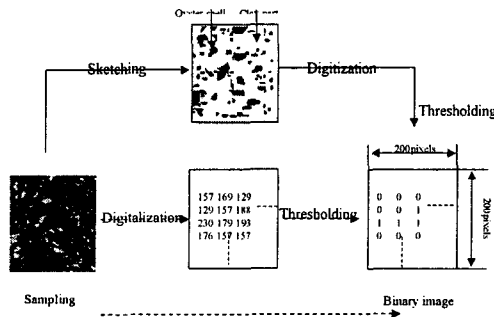


(c) Thresholding



(d) Binary image
그림 9 DIB-modeling

Pathway A. The calculation of apparent hydraulic conductivity



Pathway B. The calculation of apparent elastic modulus

그림 10 DIB-modeling에 의한 단위구조 제작방법

4.3 굴패각의 겉보기 활선변형계수

그림 11은 제안한 기법으로부터 구한 굴패각의 겉보기 변형계수를 굴패각의 체적비와의 관계로 정리한 것이다. 우선, 변형15%에서의 겉보기 변형계수는 굴패각 혼합율이 증가하면, 같이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 그 증가 경향은 압밀응력에 따라 많은 차이를 보였다. 압밀응력이 49kPa의 경우 혼합율이 증가하면 변형계수는 산술적으로 증가하나 혼합율이 60%를 넘으면 그 증가폭은 더욱 현저하게 나타났다.

한편, 압밀응력이 98kPa의 경우는 굴패각 혼합율이 20%에서 60%까지는 순차적으로 증가하고 60%에서 80%사이에서도 급격한 변형계수의 변화는 보이지 않는다. 이와 같은 결과는 압밀응력에 의해 형성된 굴패각의 골격구조가 다르기 때문이라고 판단된다. 즉, 압밀응력 98kPa의 경우 굴패각 혼합율이 20%에서 40%까지는 확실한 굴패각 골격구조가 형성되지 않은 것으로 판단된다. 또한 굴패각의 겉보기 변형계수는 압밀응력이 49kPa의 경우가 98kPa보다 큰 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 수치해석상의 수렴치인 삼축실험으로부터 구한 혼합토의 변형계수들간의 차이에서 그 원인을 찾을 수 있을 것이다. 이와 같은 결과는 삼축실험의 응력-변형관계에서도 설명될 수 있다.

그리고, 그림 11을 통해서 알 수 있듯이 49kPa인 경우, 1% 변형과 15% 변형에서의 굴패각의 겉보기 변형계수의 변화가 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 98kPa의 경우는 굴패각 혼합율 60%에서 최대 값을 나타내고 이후 거의 일정한 값을 유지하였다.

그림 12는 위와 같은 결과의 차이를 고찰하기 위해 해석에 사용한 기질점토와 혼합토의 변형계수의 차이를 나타낸 것이다. 그림의 변화 경향도 그림 11의 변화경향에 대응하고 있음에 따라 굴패각 혼합에 의해 발생하는 기질점토와 혼합토의 변형계수의 차를 해소하기 위해서는 굴패각의 겉보기 변형계수를 대수적으로 증가시켜야만 한다. 또한, 압밀응력98kPa, 축변형 1%, 혼합율60, 80%의 결과는 상술한 고찰에 의해 정확하게 설명된다고 단언할 수 없다. 이러한 차이는 실제의 미시구조의 차이에 의해 발생하는 것은 확실하고 혼합토의 전단거동이 압밀응력, 혼합율, 변형크기에 의해 복잡하게 변화하는 이유도 여기에 있다고 판단된다. 이후 이에 관한 내용이 보완된다면 더욱 유익한 결과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

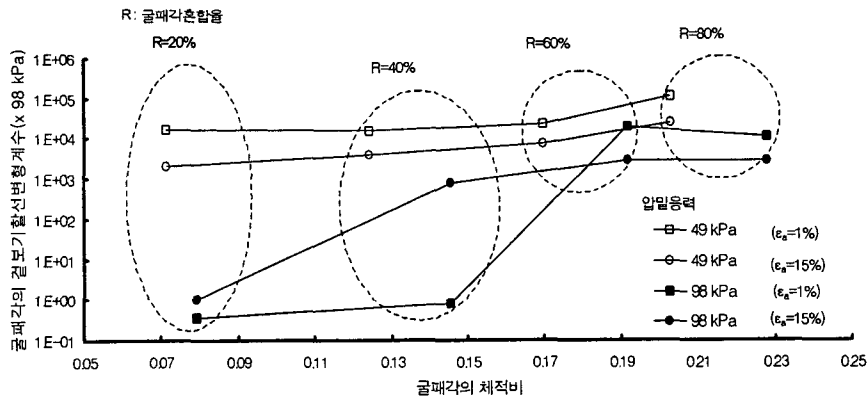


그림 11 겉보기변형계수-굴패각체적비의 관계

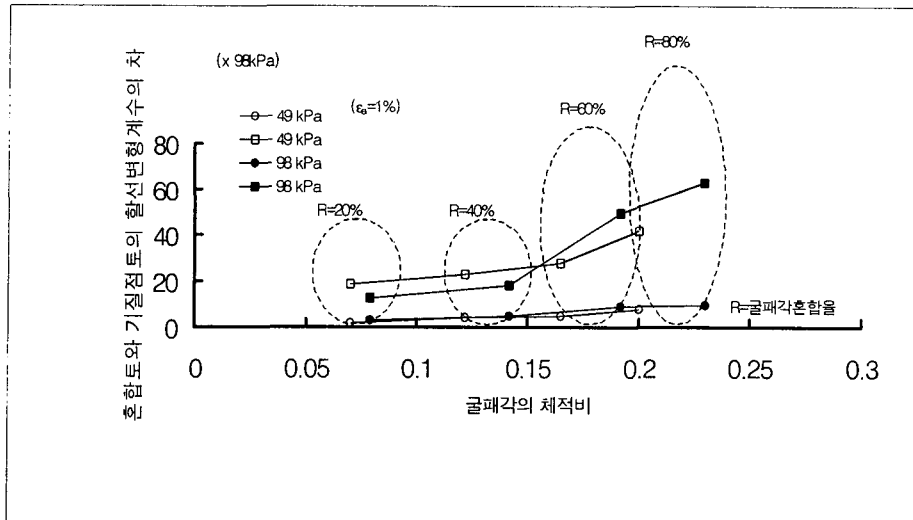


그림 12 기질점토와 혼합토의 변형계수의 차이

5. 결론

준설점토와 과쇄한 골패각으로 구성된 혼합토의 비배수 전단강도·변형특성을 삼축실험에 의해 검토했다. 또한, 균질화법에 의해 골패각이 기질점토에 미치는 영향을 고찰했다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 순수점토와 혼합토의 비배수강도를 비교하면 혼합토의 비배수강도가 크게 나타났다. 골패각 혼합에 의한 전단강도의 증가는 골패각 혼합율에 거의 비례하고 압밀응력에 의존하지 않았다.

(2) 삼축실험으로부터 구한 응력-변형 관계와 과잉간극수압 발생특성을 검토한 결과, 혼합토내의 골패각 골격구조는 압밀응력, 혼합율, 전단변형의 크기 등에 따라 복잡하게 변화하는 것으로 판단되었다. 혼합토의 전단거동이 구성요소의 전단거동의 평균치로 나타나지 않는 것은 혼합토의 다일레이턴시 특성이 평균거동을 나타내지 않기 때문이라고 판단된다.

(3) 균질화이론에 의한 수치해석으로부터, 골패각의 활선변형계수를 평가하는 것에 의해 골패각의 혼합에 의한 변형계수의 개선효과를 평가했다. 그 결과, 기질점토와 혼합토의 변형계수의 차를 해소하기 위해 골패각의 겉보기 변형계수가 크게 산정 되어야 하는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. I. Babuska(1976), "Homogenization approach in engineering ,in Computing Methods in Applied Sciences and engineering", Lecture Note in Economics and Mathematical systems 134, J. L. Lions and R. Glowinskieds, springer, Berlin, pp.137-153.
2. E. Sanchez-palencia(1980), "Non-homogeneous Media and Vibration Theory, Lecture Notes in Physics 127 Springer Verlag", Berlin
3. M. Hukue, S. Okusa, T. Nakamura(1986), "Consolidation of sand-clay mixtures", ASTM, STP, No. 892, pp.627-641
4. R. Hill(1965), "A self-consistent mechanics of composite materials", J. Mech.Phys.Solids, Vol. 13, pp.213-222
5. K. H. Lee, M. Kazama, K. Terada, E. Yanagisawa(2000), "Permeability characteristics of dredged sludges mixed with crushed oyster shells", Proceedings of the international symposium on coastal geotechnical engineering, Is-Yokohama, pp.63-66
6. K. Terada(1996) "Global-local modeling for composites by the homogenization method", Paper for

degree of doctor of Philosophy in Michigan University.

7. K. Terada, T. Miura, N. Kikuchi(1997), "Digital image-based modeling applied to the homogenization analysis of composites materials", Computational Mechanics, Vol. 20, pp.331-346
8. 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
9. 大嶺 聖, 落合英俊(1993), 二種混合體の應力-ひずみ関係と混合土の一次元壓縮特性への適用, 土木學會論文集, No. 448, III-19, pp.121-130