

반복재하에 의한 고막껍질-풍화잔류토 혼합토의 변형 특성

Characteristics of Shell-Residual Soil Mixture Deformation by Cyclic Loading

장 용 채¹ Chang, Yong-Chai

서 지 웅² Seo, Ji-Woong

이 승 은³ Lee, Seung-Eun

Abstract

This research has the purpose to examine the potential of shell, a byproduct of maritime products to be utilized as alternative environment-friendly construction material by mixing and applying it with residual soil which is used as burial or filling material to recycle it. To that end, the research looked into the mechanical characteristics of shell through cyclic triaxial test by mixing it with residual soil. With the mixing ratios of shell of 5 groups set at 5.0%, 10.0%, 20.0%, 40.0% and 60.0%, the mixture soils was processed through a series of cyclic triaxial tests. And it was shown that liquefaction resistance has limitation in the mixed soils with shell substitute content ratios exceeding 20.0%. To increase the liquefaction resistance of the mixed soil, this research has shown that addition of moderate amount of glass fibers would suffice.

요 지

본 연구는 해양부산물로 발생되는 고막껍질을 재활용하기 위하여 매립이나 성토재료로 활용되고 있는 황토에 혼합 적용함으로써 친환경적인 건설재료의 대체재료로 활용성을 연구하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 황토를 조립재료인 고막껍질과 혼합하여 반복삼축시험을 통하여 역학적인 특성을 알아보았다. 고막껍질-황토 혼합토의 혼합비율은 중량 비를 이용하였으며 황토에 고막껍질을 일정한 함유율로 혼합한 고막껍질의 혼합비율은 5종류로 하고 각각의 혼합토에 대해 반복삼축시험을 실시하였다. 반복삼축시험 결과 고막껍질 치환 함유율이 20.0% 이상인 혼합토에서 액상화 저항성에 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 고막껍질-황토 혼합토의 액상화 저항성을 증대시키고자 약간의 유리섬유를 첨가 하여 입증하였다.

Keywords : Construction material, Cyclic triaxial test, Liquefaction, Maritime products, Residual soil

1. 서 론

국토의 80% 이상이 산지인 우리나라에서는 도로, 철도, 공항건설 및 택지조성 등의 토목공사에 황토를 절·성

토 하여 건설재료로 많이 사용하고 있다. 그 중 화강암 질 풍화 잔적층은 지표면으로부터 얇은 심도에 형성되어 토목공사의 노상 또는 노반재료, 얇은 기초 구조물의 기초가 되는 지반이다.

1 정희원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Division of Ocean Civil Eng, Mokpo National Maritime Univ., geo@mmu.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 목포해양대학교 해양토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Ocean Civil Eng, Mokpo National Maritime Univ.)

3 정희원, 목포해양대학교 해양토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Ocean Civil Eng, Mokpo National Maritime Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

최근에 이르러 국토이용의 효율화를 위해 간척, 매립은 물론이고 인간의 생활공간이 산지, 구릉지대로 확대됨에 따라 풍화잔적토와 접하는 기회가 빈번해졌으며, 현장에 따라서 황토는 매립이나 성토재료로 널리 활용되고 있다.

본 연구에서는 서남해 청정해역에서 양식업 중 패류의 생산에서 부수적으로 발생하며 처리에 어려움을 겪고 있는 해양부산물의 일종인 고막껍질을 재활용하기 위하여 매립이나 성토재료로 널리 활용되고 있는 황토와 혼합 적용함으로써 친환경적인 건설재료의 대체 재료로서의 활용성을 연구하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 황토를 조립재료인 고막껍질과 혼합하여 물리·역학적인 특성을 알아보고 얻은 결과를 가지고 현장적용 가능성을 기능하고자 한다. 해양부산물인 고막껍질을 활용하기 위해서는 고막껍질이 조립재료라 하더라도 여러 가지 변수가 있다. 예를 들면 고막껍질을 수집, 운반, 살포, 다지는 과정에서 재료분리를 막기 위한 대책, 고막껍질의 입도변화가 주는 영향, 장기적으로 고막껍질의 탄산칼슘이 흡입자와 결합하여 전단저항력을 증진시킬 수 있는지 등은 차후의 연구를 보강하여 제시하고자 한다.

2. 황토의 정의 및 특성

2.1 황토의 정의

황토는 우리나라에서 황색 내지 적갈색 풍화토로서 전국에 널리 분포되어 있으며, 일반적으로 통용되는 황토의 의미는 붉거나 누르스름한 풍화잔류토(Residual soil)를 뜻한다. 학술적인 용어로 사용되는 “바람에 의해 운반되어 퇴적된 담황색 내지 황회색을 띠는 실트질(Silty) 퇴적물” 즉 풍성퇴적물인 황토(Loess)의 용어와는 글자가 같아서 혼동하는 경우가 많다. 따라서 우리나라 가까운 산에서 쉽게 볼 수 있는 황색 내지 적갈색의 풍화토를 의미하며, 우리나라의 황토는 암석이 화학적 풍화작용을 받아 변질되어 토양화된 풍화잔류토를 말한다(황진연, 1997). 지금부터 황토의 용어는 풍화잔류토의 의미로 기술하겠다.

황토는 온대지역과 사막 주변부에 나타나는 반 건조 지역에 가장 넓게 분포하며 지표면의 약 10%를 덮고 있으며, 우리나라의 황토는 세계 평균을 훨씬 웃도는 20%의 토양이 황토로 이루어져 있다.

우리나라의 황토층은 선캄브리아기에 속한 지질이

대종을 이루고 있다는 것이 일반적인 견해이며, 황토입자의 화학적 성분을 보면 실리카(SiO_2) 60~65%, 알루미늄(Al_2O_3) 13~20%, 석회(CaO) 8%, 산화철(Fe_2O_3) 5~6%, 산화마그네슘(MgO)과 산화나트륨(Na_2O)이 각 2%, 산화칼륨(K_2O) 1.5% 내외이며, 다량의 탄산칼슘(CaCO_3)을 가지고 있다(황진연 등, 2000).

2.2 황토의 기본적인 특성

자연 상태의 황토는 건조밀도가 낮고 간극비가 크며 소성도는 낮은 것을 알 수 있다. 소성도(plasticity chart)에서는 A-line위에 나타나며 ‘CL과 CL-ML영역’(문헌상의 황토)에 떨어진다. 내부 마찰각은 19~29°이며 점착력은 작고 압축계수(coefficient of compressibility)는 커서 예민비가 중간정도인 보통 정규압밀 점토의 압축성과 비슷하다. 황토입자의 비중은 대체로 2.70 전후이며 자연 함수비는 3~18%이다. 미국에서는 홀츠와 깁스(Holtz, W.G and H. J. Gibbs)가 1951년에 황토를 입도분포에 따라 사질황토(sandy loess), 실트질 황토(silty loess), 그리고 점토질 황토(clayey loess)로 구분하였는데 약간 수정되어 지금까지도 사용되고 있다 (Higgins & Modeer, 1996).

3. 액상화 현상

3.1 액상화의 정의

액상화 현상은 토질공학적 측면에서 볼 때 가장 흥미롭고도 복잡한 현상중의 하나이며, 이는 느슨하고 포화된 흙에서 관찰되는 수많은 관련현상을 설명하는데 이용되어 왔다. 일반적으로 지반이 액상화가 쉽게 일어날 가능성이 있는 포화사질토라고 해서 주어진 지진 하에서도 반드시 액상화가 발생한다는 것을 의미하지는 않는다. 즉 액상화가 일어날 가능성을 논할 때 액상화 관련현상을 반드시 고려해서 평가해야 한다.

액상화 현상은 비배수 상태의 느슨하고 포화된 사질토 지반에 진동, 폭파, 지진 등의 순간적인 반복하중으로 발생한 전단응력이 지반의 변형을 일으키며 이러한 과정에서 과잉간극수압의 발생과 동시에 유효응력이 감소하게 되어 지반의 전단저항을 잃고 액체와 같이 거동하는 현상을 말한다. 느슨하게 퇴적한 사질지반($N_{60} < 10 \sim 15$)은 지하수위가 높게 포화한 상태에서 지진과

같은 진동하중을 받으면 과잉간극수압의 발생에 의해 전단강도가 저하되어 현저하게 지지력이 감소하는 이른바 액상화 현상이 생긴다.

3.2 액상화의 기본 Mechanism

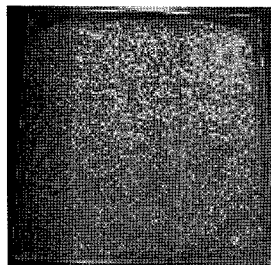
건조시킨 모래를 용기에 넣고 용기를 두드리면 모래가 잘 다져져서 표면이 침하하는 것은 누구나 알고 있는 일이지만, 모래가 포화되어 있는 경우는 입자 간에 존재하는 물이 모래가 보다 조밀하게 다져지려고 하는 성질을 막기 때문에 간극수압이 상승하고 그로 인해 유효응력이 저하한다. 극단적인 경우로서 유효응력이 '0'이 되면 전단강도도 '0'이 되어 모래는 액체와 같이 된다. 지진 또는 충격하중에 의한 액상화는 이와 같은 Mechanism에 의해 발생한다(김상규, 1991).

본 연구에서는 고막껍질-풍화잔류토 혼합토의 특성을 파악하기 위해 풍화잔류토 기반에 고막껍질을 혼합하여 반복삼축시험을 통해 고막껍질-풍화잔류토 혼합토의 변형특성을 알아보고자 한다.

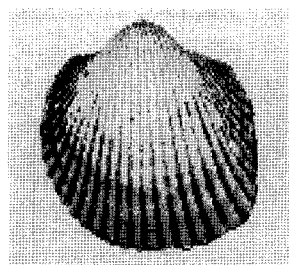
4. 혼합토의 실내시험

4.1 시험재료

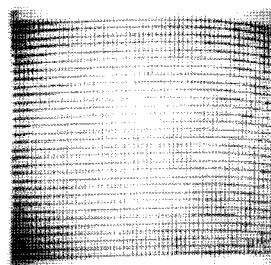
본 연구에 사용된 시험재료는 풍화잔류토와 고막껍



(a) 풍화잔류토



(b) 고막껍질



(c) 유리섬유

그림 1. 시험 재료들

질, 그리고 유리섬유를 사용하였다. 시료의 획득방법에서 황토와 고막껍질은 #4(4.75mm)체를 통과한 시료를 사용하였으며, 유리섬유는 시험을 위하여 폭 0.1cm×길이 2.0cm로 일정하게 잘라 사용하였다.

이렇듯 다양한 조건의 혼합 시료의 적용 가능성을 평가하기 위하여 반복삼축시험을 실시하였으며, 그림 1은 연구에 사용된 시험재료들을 나타내고 있다.

4.2 시험방법

혼합토로서 특성 등을 평가하기 위하여 풍화잔류토에 고막껍질, 유리섬유를 첨가한 혼합토에 대한 물리·역학적 시험을 실시하였다. 혼합토의 공학적 특성 평가를 위한 시험은 고막껍질-풍화잔류토 혼합 중량비를 이용하였으며, 고막껍질 혼합비율은 5.0%, 10.0%, 20.0%, 40.0%, 60.0%의 5종류로 변화시켜가면서 기본물성시험, 일축압축시험, 반복삼축시험을 수행하였다.

또한, 별도로 풍화잔류토에 고막껍질 혼합비율을 5.0%, 10.0%, 20.0%, 40.0%의 상태에서 유리섬유를 0.5%, 1.0%를 치환하여 반복삼축시험을 하였으며 일축압축시험과 반복삼축시험을 위한 시료조제는 다짐시험으로 얻어진 황토시료의 최적함수비 17.53%를 사용하였다. 직경 5cm, 높이 10cm인 마이터 박스에 황토의 최적함수비를 적용하여 풍화잔류토, 고막껍질, 유리섬유 혼합토의 시료를 만들었다. 사용된 유리섬유는 폭 0.1cm×길이 2.0cm로 일정하게 잘라서 혼합토에 첨가하였다.

그림 2는 유리섬유-황토를 혼합한 시료와 고막껍질-유리섬유-황토 혼합토를 나타낸 그림이다.

그림 3은 본 연구에서 사용한 다기능 삼축압축시험장치(Geocomp Corp.)로 재하장치와 압력조절장치, Cyclic Pump 로 구성되어 있어 여러 가지 조건을 자동제어 할 수 있다.

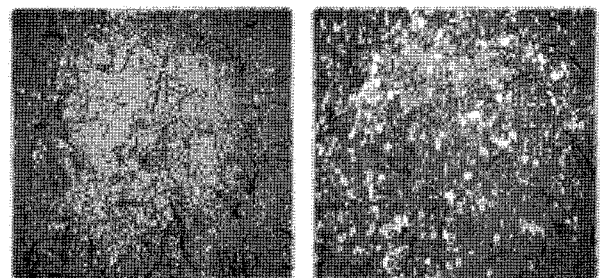


그림 2. 풍화 잔적토에 유리섬유를 첨가한 혼합토

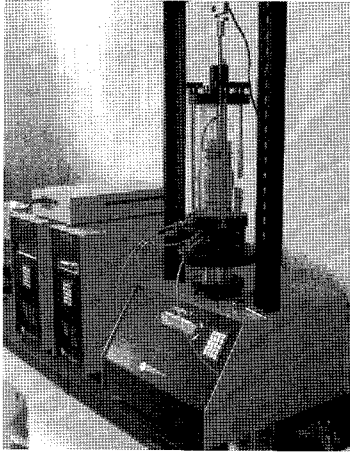


그림 3. 삼축압축시험장치

4.3 고막껍질-풍화 잔류토 혼합토의 물리적 특성

아래 표 2는 시험시료인 무안황토를 이용하여 고막껍질-풍화잔류토 혼합토의 기본물성시험 결과를 나타내었다. 풍화잔류토 100%의 비중 값은 2.56으로 낮게 나타났다. 이런 이유는 무안황토를 무안지역에서 대량으로 채취하여 실외에 2년간 방치하였기 때문이라고 판단된다. 기존의 연구에 의하면 풍화잔류토는 대부분 석영, 장석, 운모, 기타 유색광물 등의 1차광물과 일라이트, 카오리나이트, 깁사이트, 할로이사이트, 버미큘라이트 등의 2차광물로 구성되어 있으며 모암의 분포지역이나 채취장소 및 심도에 따라 각 광물성분의 함유량이 다르며,

표 1. 시료별 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위

실험 실시 항목		실험시료 번호	실험시료 및 번호
기본물성 시험	비중시험	No.1~6 No.17	No.1 풍화잔류토 100%
	입도시험		No.2 고막껍질 5.0%+풍화잔류토 95.0%
	액·소성한계시험		No.3 고막껍질 10.0%+풍화잔류토 90.0%
일축압축시험		No.1~16	No.4 고막껍질 20.0%+풍화잔류토 80.0%
반복삼축 시험	풍화잔류토	No.1	No.5 고막껍질 40.0%+풍화잔류토 60.0%
	고막껍질-풍화잔류토 혼합토	No.2~6	No.6 고막껍질 60.0%+풍화잔류토 40.0%
	유리섬유-풍화잔류토 혼합토	No.7~8	No.7 풍화잔류토 99.5%(유리섬유 0.5% 치환)
	유리섬유를 첨가한 고막껍질-풍화잔류토 혼합토	No.9~16	No.8 풍화잔류토 99.0%(유리섬유 1.0% 치환)
			No.9 고막껍질 5.0%+풍화잔류토 94.5%(유리섬유 0.5% 치환)
			No.10 고막껍질 5.0%+풍화잔류토 94.0%(유리섬유 1.0% 치환)
			No.11 고막껍질 10.0%+풍화잔류토 89.0%(유리섬유 1.0% 치환)
			No.12 고막껍질 10.0%+풍화잔류토 89.0%(유리섬유 1.0% 치환)
			No.13 고막껍질 20.0%+풍화잔류토 79.5%(유리섬유 0.5% 치환)
			No.14 고막껍질 20.0%+풍화잔류토 79.0%(유리섬유 1.0% 치환)
			No.15 고막껍질 40.0%+풍화잔류토 59.5%(유리섬유 0.5% 치환)
			No.16 고막껍질 40.0%+풍화잔류토 59.0%(유리섬유 1.0% 치환)
			No.17 고막껍질 100%

표 2. 고막껍질-풍화잔류토 혼합토의 물성시험 결과

혼합비	Gs	LL (%)	PL (%)	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _g	통일분류 (USCS)
풍화잔류토 100%	2.56	42.7	28.2	0.11	0.44	1.20	11.19	1.48	SW-SC
고막껍질 5.0% + 풍화잔류토 95.0%	2.58	39.7	26.4	0.09	0.37	1.18	13.75	1.38	SW-SC
고막껍질 10.0% + 풍화잔류토 90.0%	2.59	38.6	26.0	0.09	0.37	1.20	13.60	1.27	SW-SC
고막껍질 20.0% + 풍화잔류토 80.0%	2.61	31.7	24.6	0.13	0.56	1.53	12.99	1.64	SW-SM
고막껍질 40.0% + 풍화잔류토 60.0%	2.65	26.9	21.3	0.21	0.85	2.23	11.22	1.60	SW
고막껍질 60.0% + 풍화잔류토 40.0%	2.70	NP		0.27	1.20	2.60	9.92	2.07	SW
고막껍질 100%	2.78	NP		1.37	2.23	3.13	2.45	1.21	SP

일반적으로 석영은 풍화에 대해 안정성이 높으나 그 외의 장석류나 2차광물은 쉽게 변질되어 점성토화 과정을 거치기 때문이며(Matsuo, 1979), 액성한계는 42.7%, 소성한계는 28.2%를 보이고 있다. 통일분류법(USCS)상 이중기호인 SW-SC로 분류되어진다.

풍화잔류토에 고막겉질첨가 함유율이 높아질수록 비중 값은 증가하였으며, 순수고막겉질일 경우에는 비중 값이 2.78까지 증가하였다. 또한 액·소성 한계는 고막겉질 함유율이 높아질수록 감소함을 알 수 있었다.

5. 혼합토의 강도와 변형특성

5.1 일축압축특성

표 1과 같이 풍화잔류토, 고막겉질 그리고 유리섬유를 각기 다른 혼합비율에 따라 총 17종류로 변화시켜 실내실험을 하였다. 압축강도실험은 각각 3회씩 실시하여 평균값을 취하였다.

그림 4는 혼합토의 강도와 변형특성을 알아보기 위하여 일축압축시험을 하고 있는 모습이다. 혼합토의 시료가 파괴되기 전과 파괴된 후의 모습을 나타내고 있다.

그림 5는 재하속도 0.8mm/min로 유리섬유 첨가량에 따른 일축압축특성을 나타낸 것이다. 시험결과 유리섬유를 첨가하지 않은 고막겉질-풍화잔류토 혼합토(a)의 경우 고막겉질 함유율이 증가할수록 강도 값이 1.31kgf/cm²로부터 0.21kgf/cm²까지 점차적으로 감소하는 것으로 나타났는데, 이러한 이유는 고막겉질 함유율이 증가하면 할수록 고막겉질의 성질이 풍화잔류토의 성질보다 크게 주도하기 때문인 것으로 판단된다.

고막겉질-풍화잔류토 혼합토의 강도를 높이고자 유리섬유를 0.5%, 1.0% 첨가하여 일축압축시험을 실시한 결과 강도가 각각 1.41kgf/cm², 1.62kgf/cm²으로 순수 황

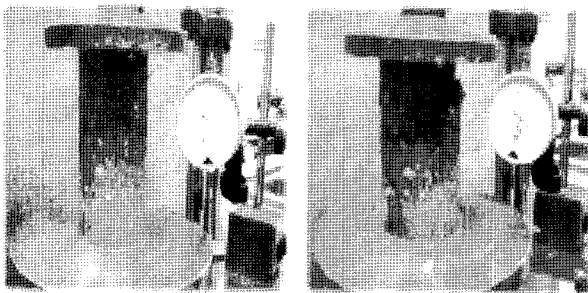
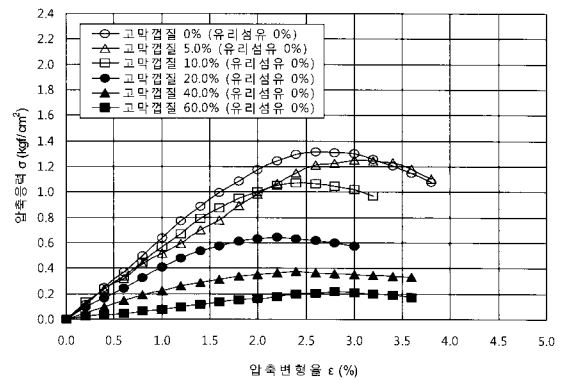


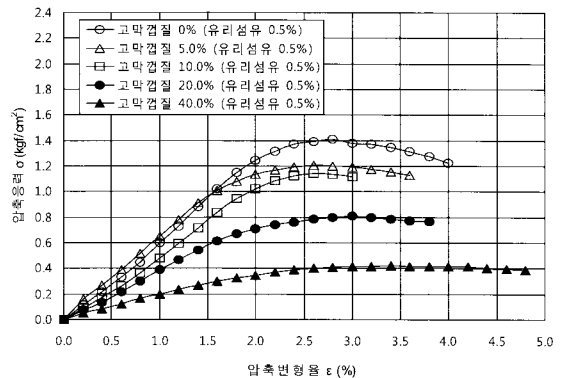
그림 4. 일축압축시험 과정

토시료의 일축압축강도 1.25kgf/cm²보다 각각 13%, 30%씩 증가함을 알 수 있었으며, 그림 6은 고막겉질 함유율 20%를 기준으로 유리섬유 0%, 0.5%, 1.0% 첨가했을 때의 일축압축특성을 나타낸 것이다.

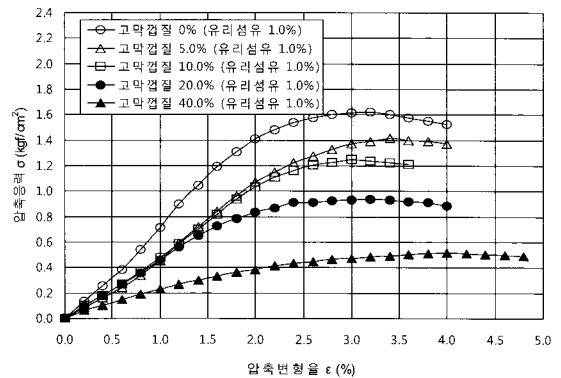
시험결과 유리섬유를 0%, 0.5%, 1.0% 첨가할 때마다 일축압축강도는 각각 0.65kgf/cm², 0.8kgf/cm², 0.94kgf/cm²로 1.25~1.45배까지 증가하였는데 이는 유리섬유가 황토입자와 유리섬유간의 결합력을 높여 강도를 증가시키기 때문으로 판단된다.



(a) 유리섬유 0% 첨가시의 혼합토의 일축압축강도



(b) 유리섬유 0.5% 첨가시의 혼합토의 일축압축강도



(c) 유리섬유 1.0% 첨가시의 혼합토의 일축압축강도

그림 5. 유리섬유 첨가 비율에 따른 일축압축시험 결과

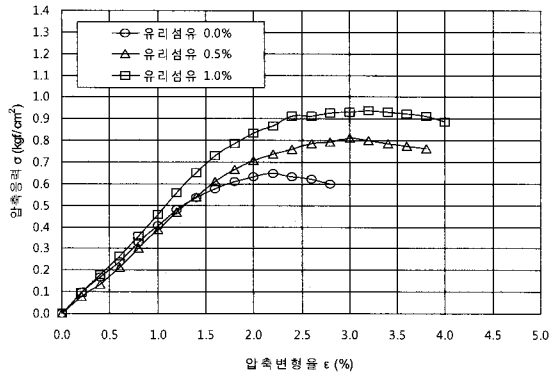


그림 6. 고막겹질-유리섬유의 일축압축강도

5.2 반복삼축시험

본 연구에서는 반복삼축시험을 통한 지진 전단응력비와 진동저항응력비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 이용하여 고막겹질-황토 혼합토의 액상화 가능성을 알아보았다.

액상화에 대한 상세예측 평가 시 기준안전율은 1.0이다. 이 때, 안전율이 1.0미만인 경우 대책공법을 마련하며, 1.0이상인 경우는 액상화에 대해 안전한 것으로 판정 식 (1)과 같다.

$$F_s = \frac{\text{진동저항응력비}(CRR)}{\text{지진전단응력비}} \geq 1.0 \therefore \text{안전} \quad (1)$$

지진력을 표현한 지진 전단응력비는 아래 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_z} = 0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_z}{\sigma'_z} \right) (\gamma_d) \quad (2)$$

여기서, a_{\max} = 최대지반가속도

g = 중력가속도

σ_z = 해당 깊이의 전응력

σ'_z = 유효응력

γ_d = 깊이에 대한 감소계수

본 연구에 사용된 풍화잔류토는 전라남도 무안에서 채취 하였으며, 지진구역의 구분으로는 전라남도 남서부(II)에 속한다.

최대지반가속도를 산정하기 위해서 국내 내진 설계 표준서와 반복삼축시험 결과를 이용하여 액상화 상세예측을 수행할 경우, 지진의 방향성 및 현장응력상태에 대한 보정이 필요하기 때문에 진동저항응력비(CRR)는 식 (3)을 이용하여 보정한 후 산정하였다.

$$(CRR)_{TXC(\text{보정})} = C_1 C_2 (CRR)_{TXC} \quad (3)$$

여기서,

$C_1 = 0.9$ (지진의 방향성 대한 보정상수)

$C_2 = (1+2K_0)/3$ (현장응력상태에 대한 보정상수)

K_0 = 지진하중 작용전의 정지토압계수

$(CRR)_{TXC}$ = 시험에서 얻어진 저항전단응력비

5.3 혼합토의 진동응력비

5.3.1 고막겹질-황토 혼합토

황토와 혼합비율을 달리한 5종류의 고막겹질-황토 혼합토에 대하여 비배수 상태에서 시료에 가해진 진동응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)와 액상화 발생시점의 진동재하횟수(Number of Cycles, N)와의 관계를 결정하고자 한다. 액상화의 판정은 국내 지진규모인 6.75를 고려한 액상화 저항응력비를 산정하기 위하여 반복재하횟수가 10회인 지점의 값을 기준으로 한다(국토해양부, 1999).

고막겹질-황토 혼합토의 반복삼축시험 결과 진동응력비(CSR)과 반복재하횟수(N)의 관계를 그래프로 나타내면 다음 그림 7과 같다.

여기서 양진폭(DA) 10% 기준으로 진동반복횟수(N)가

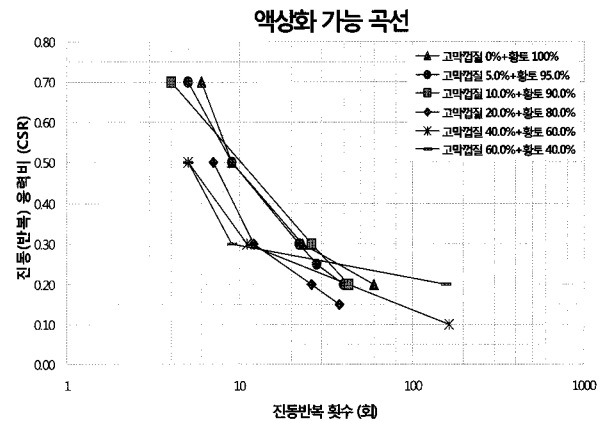


그림 7. 고막겹질-황토 혼합토의 CSR-N 관계 곡선

표 3. 고막겹질-황토 혼합토의 N=10회 일 때 CSR

혼 합 비	진동반복횟수(N) 10회 일 때 진동응력비(CSR)
고막겹질 0%+황토 100%	0.480
고막겹질 5.0%+황토 95.0%	0.480
고막겹질 10.0%+황토 90.0%	0.500
고막겹질 20.0%+황토 80.0%	0.365
고막겹질 40.0%+황토 60.0%	0.325
고막겹질 60.0%+황토 40.0%	0.295

10회 일 때 진동응력비(CSR)를 나타내면 표 3과 같다.

고막겉질-황토 혼합토의 반복삼축시험 결과를 보면 고막겉질의 첨가량이 증가할수록 진동응력비(CSR)는 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

아래 표 4는 진동응력비(CSR)와 액상화 저항전단응력비(CRR)를 고려하여 고막겉질-황토 혼합토의 액상화 안전율을 산정하였다.

고막겉질-황토 혼합토에 대한 반복삼축시험 결과로부터 획득한 반복재하 횟수별 진동응력비(CSR)는 반복재하 10회(진도 6.5기준)에서 0.295~0.500으로 나타났다. 이 값에 지진의 방향성에 대한 보정상수 $C_1(=0.9)$ 과 현장응력상태에 대한 보정상수 $C_2(=0.67)$ 를 곱하여 획득한 현장에서의 저항전단응력비(CRR)는 0.18~0.30으로 도출되었다. 이 값과 최대 지반 가속도 값을 비교하여 액상화에 대한 안정성을 평가하면 다음과 같다. 고막겉질 함유율이 증가할수록 안전율이 감소하였으며, 내진 1등급에서는 20.0%, 내진 2등급에서는 40.0% 이상 일 때부터 기준 안전율인 1.0이하로 나타나 액상화 발생 가능성이 있는 것으로 나타났다.

5.3.2 고막겉질-황토-유리섬유 혼합토

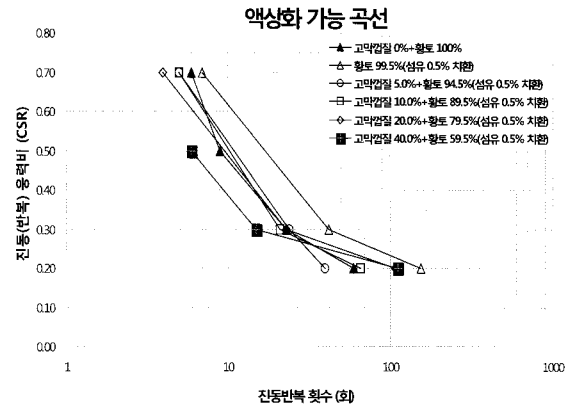
앞서 실시한 고막겉질-황토 혼합토의 반복삼축시험 결과 고막겉질의 혼합비율이 20% 이상일 때 혼합토 자체만으로는 액상화 저항성에 한계가 있는 것으로 실험되었다. 따라서 액상화에 대한 안전율을 높이고자 황토와 5종류의 고막겉질-황토 혼합토에 유리섬유를 각각

표 4. 고막겉질-황토 혼합토의 액상화 안전율

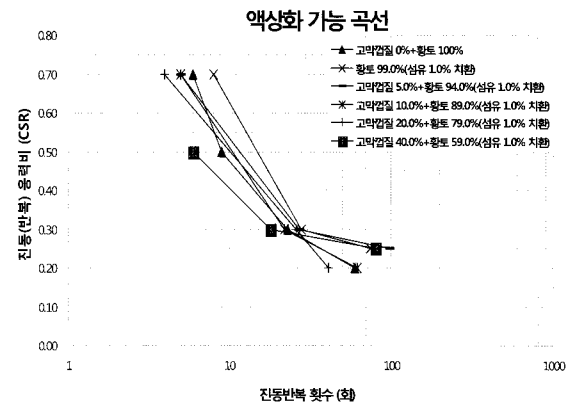
혼합비	내진 등급	전단 응력비	(CRR) _{TXC}	(CRR) _{TXC} (보정)	안전율	비고
고막겉질 0% + 황토 100%	1등급	0.262	0.480	0.290	1.10	OK
	2등급	0.204	0.480	0.290	1.41	OK
고막겉질 5.0% + 황토 95.0%	1등급	0.262	0.480	0.290	1.10	OK
	2등급	0.204	0.480	0.290	1.41	OK
고막겉질 10.0% + 황토 90.0%	1등급	0.262	0.500	0.300	1.15	OK
	2등급	0.204	0.500	0.300	1.47	OK
고막겉질 20.0% + 황토 80.0%	1등급	0.262	0.365	0.220	0.84	NO
	2등급	0.204	0.365	0.220	1.07	OK
고막겉질 40.0% + 황토 60.0%	1등급	0.262	0.325	0.200	0.74	NO
	2등급	0.204	0.325	0.200	0.96	NO
고막겉질 60.0% + 황토 40.0%	1등급	0.262	0.295	0.180	0.68	NO
	2등급	0.204	0.295	0.180	0.87	NO

0.5%, 1.0% 첨가하여 총 10종류의 혼합토에 대해서 반복삼축시험을 실시하였다. 그림 8은 진동응력비(CSR)와 반복재하횟수(N)의 관계를 보여주고 있다.

마찬가지로 액상화 발생가능성 유무를 판정하기 위하여 그림 10으로부터 양진폭(DA) 10%를 기준으로 한 진동반복횟수(N)가 10회 일 때, 진동응력비(CSR) 값을



(a) 유리섬유 0.5% 첨가 혼합토



(b) 유리섬유 1.0% 첨가 혼합토

그림 8. 유리섬유를 첨가한 혼합토의 CSR-N 관계 곡선

표 5. 유리섬유를 첨가한 혼합토의 N=10회 일 때 CSR

혼합비	진동반복횟수(N) 10회 일 때 진동응력비(CSR)
고막겉질 0%+황토 100%	0.480
고막겉질 0%+황토 99.5%(0.5%)	0.620
고막겉질 0%+황토 99.0%(1.0%)	0.630
고막겉질 5.0%+황토 94.5%(0.5%)	0.525
고막겉질 5.0%+황토 94.0%(1.0%)	0.535
고막겉질 10.0%+황토 89.5%(0.5%)	0.510
고막겉질 10.0%+황토 89.0%(1.0%)	0.515
고막겉질 20.0%+황토 79.5%(0.5%)	0.490
고막겉질 20.0%+황토 79.0%(1.0%)	0.505
고막겉질 40.0%+황토 59.5%(0.5%)	0.385
고막겉질 40.0%+황토 59.0%(1.0%)	0.405

*혼합비에서 ()는 유리섬유 치환 함유율

구하면 표 5와 같다. 표 5에서 진동응력비(CSR)값은 고막겉질의 함유율이 증가할수록 감소하며, 유리섬유를 첨가하면 증가하는 경향을 나타내었다.

표 6은 고막겉질-황토 혼합토에 유리섬유를 각기 다른 비율로 혼합하여 액상화에 대한 안전율을 구한 결과이다.

표 6에서 지진시 발생하는 지진 전단응력비(τ_d/σ'_v)는 지표면 최대지반가속도(a_{max})를 가정하여 결정하였고, 이것을 반복삼축시험에 의해서 구한 액상화 저항응력비와 비교하였다.

아울러 반복삼축시험으로부터 획득한 진동횟수별 진동응력비(CSR) 결과로부터 진동 10회(진도 6.5기준)에서의 저항전단응력비(CRR)_{TXC}는 0.385~0.630으로 나타났다. 마찬가지로 지진의 방향성에 대한 보정상수 $C_1(=0.9)$ 과 현상응력상태에 대한 보정상수 $C_2(=0.67)$ 를 곱하여 식 (3)으로부터 획득한 현장에서의 저항전단응력비(CRR)_{TXC(보정)}

표 6. 유리섬유를 첨가한 혼합토의 액상화 안전율

혼합비	내진 등급	전단 응력비	(CRR) _{TXC}	(CRR) _{TXC(보정)}	안전율	비고
고막겉질 0% + 황토 100%	1등급	0.262	0.480	0.290	1.10	OK
	2등급	0.204	0.480	0.290	1.41	OK
고막겉질 0% + 황토 99.5%(0.5%)	1등급	0.262	0.620	0.370	1.42	OK
	2등급	0.204	0.620	0.370	1.82	OK
고막겉질 0% + 황토 99.0%(1.0%)	1등급	0.262	0.630	0.380	1.44	OK
	2등급	0.204	0.630	0.380	1.85	OK
고막겉질 5.0% + 황토 94.5%(0.5%)	1등급	0.262	0.525	0.320	1.20	OK
	2등급	0.204	0.525	0.320	1.54	OK
고막겉질 5.0% + 황토 94.0%(1.0%)	1등급	0.262	0.535	0.320	1.23	OK
	2등급	0.204	0.535	0.320	1.57	OK
고막겉질 10.0% + 황토 89.5%(0.5%)	1등급	0.262	0.510	0.310	1.17	OK
	2등급	0.204	0.510	0.310	1.50	OK
고막겉질 10.0% + 황토 89.0%(1.0%)	1등급	0.262	0.515	0.310	1.18	OK
	2등급	0.204	0.515	0.310	1.51	OK
고막겉질 20.0% + 황토 79.5%(0.5%)	1등급	0.262	0.490	0.290	1.12	OK
	2등급	0.204	0.490	0.290	1.44	OK
고막겉질 20.0% + 황토 79.0%(1.0%)	1등급	0.262	0.505	0.300	1.16	OK
	2등급	0.204	0.505	0.300	1.49	OK
고막겉질 40.0% + 황토 59.5%(0.5%)	1등급	0.262	0.385	0.230	0.88	NO
	2등급	0.204	0.385	0.230	1.13	OK
고막겉질 40.0% + 황토 59.0%(1.0%)	1등급	0.262	0.405	0.240	0.93	NO
	2등급	0.204	0.405	0.240	1.19	OK

는 0.23~0.38로 도출되었다.

이 값과 최대지반가속도(a_{max})를 비교하여 내진 1등급과 내진 2등급에 대한 액상화 안전율을 검토해 보면 액상화에 대한 안전율은 순수 황토일 때는 높지만, 여기에 고막겉질을 첨가하면 첨가율에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 극복하기 위해 황토에 유리섬유를 첨가하면 유리섬유의 함유율 증가에 따라 액상화에 대한 안전율이 증가하는 것을 알 수 있다. 순수 황토에 고막겉질과 유리섬유를 혼합하여 적용할 경우 고막겉질의 한계 사용범위는 표 4, 6에 나타난 바와 같다.

5.4 전체 혼합토에 대한 변형특성

앞서 실시한 고막겉질-황토 혼합토와 유리섬유를 첨가한 고막겉질-황토 혼합토에 대한 내진 1, 2등급일 때 안전율을 비교하여 나타내면 그림 9와 같다.

내진 1등급일 때 고막겉질과 황토만의 혼합토에서는 고막겉질 20.0%+황토 80.0%(혼합토 번호 No.4), 고막겉질 40.0%+황토 60.0%(No.5), 고막겉질 60.0%+황토 40.0%(No.6)의 3종류의 혼합토가 액상화 안전율이 1.0 이하로 나타났으며, 고막겉질의 함유율이 20% 이상이 되면 액상화 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 고막겉질-황토 혼합토에 유리섬유를 첨가한 경우는 고막겉질의 함유율이 40%이상(No.15, 16)에서 모두 소요안전율을 충족시키지 못한 것으로 나타났다. 고막겉질-황토-유리섬유의 혼합토에서는 고막겉질의 함유율이 40% 이상 되면 액상화 가능성이 높은 것으로 판단된다.

내진 2등급일 때에는 액상화에 대한 안전율은 고막겉질 40.0%+황토 60.0%(No.5), 고막겉질 60.0%+황토 40.0%(No.6) 혼합토의 고막겉질 혼합비율이 40.0% 이상인 2종류의 혼합토가 액상화 안전율이 1.0을 충족시키지 못한 것으로 나타났다. 고막겉질과 황토만의 혼합

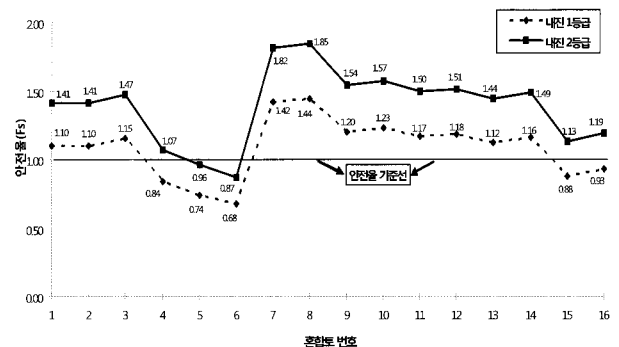


그림 9. 전체 혼합토의 액상화 안전율 그래프

토에서는 고막겉질의 함유율이 40% 이상이 되면 액상화 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

고막겉질-황토 혼합토에 유리섬유를 첨가한 경우는 실험한 값의 모든 범위 내에서 소요안전율을 충족시킨 것으로 나타났다. 즉 유리섬유가 액상화에 대한 억제효과가 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 우리지역에 광범위하게 분포하고 있는 황토에 자원의 재활용성을 확대하기 위하여 해양부산물인 고막겉질을 혼합 적용하여 그 시험결과를 중심으로 상호간에 역학적 특성을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 황토 자체만의 비중은 2.56이며, 입도분석 결과 SW-SC(점토 섞인 입도양호한 모래)로 분류된다.
- (2) 고막겉질-황토 혼합토의 비중특성은 황토에 고막겉질을 치환 혼합할수록 비중값은 2.56~2.78로 점차적으로 증가하였고, 액성한계와 소성한계는 점차 감소하는 경향을 나타내었다.
- (3) 반복삼축시험 결과 순수 황토 시료는 내진 1, 2 등급 모두 액상화에 안전한 것으로 나타났다.
- (4) 내진 1등급일 때 각종 혼합토의 액상화에 대한 안전율은 고막겉질과 황토만의 혼합토에서는 고막겉질의 함유율이 20% 이상이 되면 액상화 가능성이 높은 것으로 나타났으며, 고막겉질-황토 혼합토에 유리섬유를 첨가한 경우는 고막겉질의 함유율이 40% 이상인 경우 액상화 발생가능성이 높은 것으로 나

타났다.

- (5) 내진 2등급일 때 각종 혼합토의 액상화에 대한 안전율은 고막겉질과 황토만의 혼합토에서는 고막겉질의 함유율이 40% 이상이 되면 액상화 가능성이 높았으며, 고막겉질-황토 혼합토에 유리섬유를 첨가한 경우는 실험한 값의 모든 범위 내에서 소요안전율을 충족시킨 것으로 나타났다.
- (6) 유리섬유를 첨가한 고막겉질-황토 혼합토의 시험결과로부터 알 수 있듯이 고막겉질을 증가시키면 액상화 안전율이 낮아지는 경향을 보이며, 유리섬유를 첨가하면 액상화 안전율이 증가되는 것으로 나타났다. 유리섬유를 첨가하면 액상화 안전율이 증대되는데 이는 유리섬유의 인장강도에 의해 흙 구조물의 역학적 안정성이 증진된 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김상규, “토질역학” (2006), pp.181.
2. 국토해양부 (1999), “항만 및 어항시설의 내진설계표준서”.
3. 황진연 (1997), “맥반석과 황토의 특성과 활용”, *한국광물학회지 창립 10주년 기념 심포지움 논문집*, pp.89-99.
4. 황진연, 장명익, 김준식 등 (2000), “우리나라 황토(풍화토)의 구성광물 및 화학성분”, *한국광물학회지*, 제 13권 제 3호.
5. Higgins, J.D. and V.A. Modeer, Jr. (1996), “Loess”, in *Landslides-Investigation and Mitigation*, A.K. Turner and R.L. Schuster, editors, *TRB Special Report 247, National Research Council Washington, D.C.*
6. Matsuo, S., Nisida, K. and Sasaki, S. (1979), “Physical properties of weathered Granite soil particles and their effect on permeability”, *soils and foundations, Japanese Society of soil Mechanics and foundation engineering*, Vol.19, No.1, pp.13-22.

(접수일자 2009. 3. 11, 심사완료일 2009. 8. 11)