

Micro-Fiber의 혼합에 의한 해성준설점토의 보강에 관한 실험적 연구 AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE REINFORCING EFFECT OF MARINE DREDGING CLAY MIXED WITH MICRO-FIBER

박영목¹⁾, Yeong-Mog Park, 허상목²⁾, Sang-Mog Heo

¹⁾영남대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate professor, Dept. of Civil Eng., Yeungnam Univ., Gyongsan, Gyongbook.

²⁾계명대학교 공과대학 토목공학과 강사, Lecturer, Dep. of Civil Eng., Keimyong Univ.

SYNOPSIS : An experimental study has been carried out to investigate the reinforcing effect of marine dredging clay(MDC) mixed with the Micro-Fiber(MF). A series of laboratory tests was performed using specimens of MDC alone and MDC with MF by means of uniaxial and triaxial compression test. In the test programme, three stages of water content of MDC were chosen according to the elapsed time after dredging, and content and length of MF were considered as important factors for reinforcing effect. And the developed strength due to curing was measured both in MDC and composite. The enhancement of strength of composite was found to be increased with the increasing content and length of MF, and curing time, and with decreasing water content of MDC. An additional study has been made for in-situ trafficability on the soft reclaimed ground by MDC due to high water content. It was found that the waste lime was to be applicable for this purpose to get a reinforcing effect of MDC. A further study would lead to the better understanding of the reinforcing mechanism of the composite.

Key words : Micro-Fiber, 해성준설점토, 천층연약지반개량, 혼합보강

1. 서 론

좁은 국토 면적을 가진 우리나라는 고도의 산업발전과 급격한 인구증가에 편승하여 주택단지 확보 및 산업시설 부지조성 등의 국토확장이 절실하게 요망된다. 3면이 바다로 둘러 쌓여 있는 지형 특성상 국토의 효율적인 확장은 서, 남해안의 천해를 대상으로 간척매립사업을 통하여 이루어지는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 간척매립사업은 초기에는 인근의 육상에서 운반된 쇄석을 주로 이용했으나 토취장 부족 및 자연 환경 훼손 등에 기인하여 최근에는 준설선을 이용한 해성준설토를 운반하여 매립재로 활용하는 경향이 증가하고 있다. 준설매립은 사질토를 대상으로 하는 것이 효율적이거나, 지역여건들을 고려하여 해성점토를 이용하는 경우도 많다. 해성점토를 준설매립재로 사용할 경우 흙입자의 침강 시간이 길어 매립작업에 장기간이 소요될 뿐만 아니라, 침강되어 형성된 지반은 지지력이 부족하여 건설장비 진입의 곤란 등 다양한 공학적인 문제점을 내포하고 있다. 이와 같은 문제점 해결 방안으로 현재까지 해성준설점토 매립장에 대해서는 장기간 방치에 의한 자연고화방법 및 수평드레인 타설 공법(新術 등, 1988) 등을 적용하여 표층을 개량하고 있는 실정이다.

최근 국내에서 표층고화처리방법의 대표적인 예로 울촌 제1지방산업단지 조성공사에서는 Progressive Trenching Method(PTM)을 이용하고 있으며 이는 수차례에 걸쳐 매립토의 표층부를 갈아엎어 인위적

으로 트렌치망을 형성하여 배수 및 증발효율을 증가시켜 단기간내에 표층면에 건조층(Desiccation Crust)을 형성시키는 방법이나, 이 경우 함수비가 높은 준설토에 대해서는 효율적인 트렌치망의 형성에 어려움이 따른다고 보고하고 있다(박, 박, 1997).

한편, 섬유생산기술의 급격한 발전과 더불어 전세계적으로 연간 약 10억m² 정도의 토목섬유가 각종 토목 구조물에 적용되는 등 활성화되었다. 그러나, 흙의 역학적 특성을 개선하기 위해 흙에 짧은 길이의 섬유(Micro-Fiber)를 혼합하는 섬유혼합 보강토 공법은 아직까지 기술발전이 미흡하여 공법에 실용화가 미진한 실정이다(한국건설기술연구원, 1994). Micro-Fiber의 적용 시험은 1989년 미국의 XIT Paving and Construction Company에서는 도로 노상층의 건설을 위해 섬유 혼합 보강토 공법을 시험시공 하였으며, 1991년 미국의 Synthetic Industries사와 Texas Department of Transportation에서 흙사면과 흙노반의 보수를 위해 섬유혼합 보강토 공법을 적용하였다.

이러한 시험시공의 결과로부터 섬유 혼합 보강토 공법의 경제성과 시공성이 우수하다는 연구성과가 보고되고 있으나, 우리나라에서는 아직까지 Micro-Fiber를 흙과 혼합하여 시공한 사례와 연구실적이 미진한 상태이다. 또한, Micro-Fiber재는 조립토를 대상으로 개량효과가 뛰어나다고 보고되고 있으나 점성토에는 보강효과가 미미하다는 지적도 있다(한국건설기술연구원, 1994). 그러나 조건이 불량한 해성점토에 대해서도 대상 흙의 특성에 맞게 적정 혼합된 보강재는 충분히 역학적 특성의 개선효과가 있을 것으로 판단되며, 경우에 따라서는 최근에 산업폐기물로 문제시되고 있는 폐석회(Waste Lime, WL)를 고화재로 추가 혼합하면 충분히 지반개량효과를 거양할 수 있을 수 있을 것으로 사료된다.

이와같은 관점에서 본 연구에서는 해성준설토 매립지반의 효율적인 개량을 위하여 대표적인 해성준설토를 대상으로 함수비 상태에 따라 Micro-Fiber(MF)의 길이와 혼합율을 변화시키면서 다양한 실내 시험을 실시하여 양생일수별 보강효과를 검토함과 동시에 투수성을 평가하고 Micro-Fiber 혼합에 의한 해성준설토의 보강효과를 검토하였다.

2. 실험재료

2.1 해성준설토

준설토 매립지는 퇴적위치에 따라 토질특성이 매우 불규칙하게 나타나며, 해성점토의 퇴적층은 매우 불안정한 공학적 특성을 가진다. 본 연구에서 대상으로 한 흙 시료는 전남 순천시, 여천군, 광양시 일원에 조성되는 266만평 규모의 울촌 제1지방 산업단지조성공사에 매립재로 사용된 것 중에 조건이 불량한 해성준설토를 이용하였으며, 그림 1에 시료의 채취위치를 나타낸다.

본 실험을 위하여 시료를 채취한 시기는 준설토 매립이 완료되어 7개월이 경과한 후이며, 이때의 물리적 성질은 표 1에 나타내고 있다.

A다짐법에 의하여 본 실험에 이용한 해성준설토의 다짐시험을 실시한 결과 최대건조밀도(γ_{dmax})는 1.525gf/cm³, 최적함수비(OMC)는 25.8%를 나타내었다. 그림 2에는 해성준설토의 다짐곡선을 일반적인 CH시료의 다짐곡선(정, 1979)과 병행하여 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 본 시험용 시료는 일반적인 CH의

다짐곡선보다 최대건조밀도(γ_{dmax})와 최적함수비(OMC)가 다소 낮은 특성을 나타낸다.

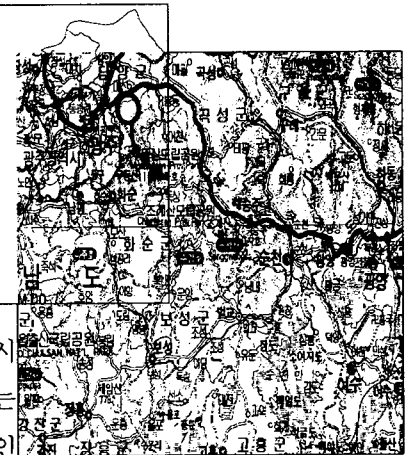


그림 1 해성준설토 시료채취 위치

표 1 준설풀토의 물리적 성질

Water content (%)	Gs	Atterberg Limit		γ_{dmax} (gf/cm ³)	OMC (%)	USCS
		WL (%)	WP (%)			
75	2.66	65	31.5	1.525	25.8	CH

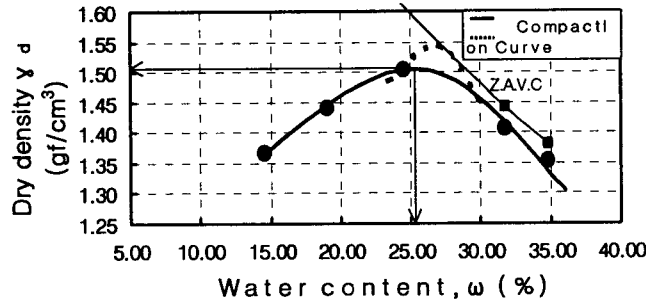


그림 2 준설풀토의 다짐곡선

2.2 섬유재료(Micro-Fiber)

본 실험의 보강재로 미국의 Synthetic Industries사가 제조한 섬유재료를 사용하였다. 섬유재료인 Micro-Fiber(MF)는 길이 1inch, 2inch의 두종류가 있으며, 양자 모두 수개의 격자모형의 형태를 갖추며 하나의 선형으로 구성 되어 있다. 2inch길이의 MF는 1inch의 것보다 유연성이 크고, 자연상태에서 영킴 현상이 크게 나타나는 특성을 가지고 있다. 표 2에는 실험에 사용된 1inch 길이의 MF에 대한 물리, 역학적 성질을 나타내고 있다.

표 2 Micro-Fiber의 물리, 역학적 성질(SYNTHETIC IND., 1993)

Property	Test Method	Typical Values
Polypropylene	ASTM D4101 Group1/Class/Grade2	99.4%
Color	-	Black
Moisture Absorption	-	Nil
Fiber Length	Measured	1inch
Specific Gravity	ASTM D792	0.91gr/cm ³
Carbon Black Content	ASTM D1603	0.6%
Tensile Strength	ASTM D2256	3,161kgf/cm ²
Tensile Elongation	ASTM D2256	15%
Young's Modulus	ASTM D2101	49,174kgf/cm ²

2.3 폐석회(Waste Lime)

고화재로서 인천동양화학공업(주)에서 소금(2NaCl)과 석회석(CaCO₃)을 반응시켜 소다회(Na₂CO₃)의 생산과정에서 부산물로 발생한 폐석회(Waste Lime, WL)를 사용하였다. 현재 침전지에서 침전물로 유지되는 상태와 야적장에 탈수케익 상태로 약 310만톤의 WL이 집적되어 있으며, 매일 많은 양의 WL이 지속적으로 부산되므로, 향후 야적장의 부족으로 인해 많은 문제점이 발생할 가능성이 있어 WL의 효과적인 이용이 시급히 요망되는 실정이다.

신 등(1997)의 시험결과에 의하면, 폐석회의 No. 200번체 통과량은 97.5%로 실트쉬인 점성토의 종류에 속하며, 비중은 2.035~2.147로 일반적인 점토보다 낮은 값을 나타내고 있다.

3. 실험조건 및 방법

3.1 시료 조제

해성준설햄점에 MF의 혼합에 따른 보강효과를 검토하기 위하여 각종 시료를 조제하여 실내 시험을 실시하였다. 다짐시험용 시료는 자연 상태의 해성준설햄점을 공기건조 상태에서 나무망치를 이용하여 잘게 부수어 시료를 사용하였으며, MF 및 WL은 노건조 상태의 시료를 적정 중량비로 준설햄점에 혼합하여 사용하였다. 강도 시험에 사용한 공시체는 다짐시험을 통해 구한 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도(γ_{dmax}) 상태로 조제하였으며, 준설햄점 후 7개월이 경과한 상태의 자연함수비가 75%, 10개월이 경과한 상태인 자연함수비가 45%인 조건에서 각 시료에 대하여 동일한 다짐에너지를 가하여 시료를 조제하였다.

일축압축 및 삼축압축시험용 공시체는 직경 50mm, 높이 100mm인 한국공업규격 K.S제품인 P.V.C 파이프를 시료성형 몰드로 사용하였으며, 몰드의 상단과 하단을 랩으로 씌워서 함수비의 변화를 최대한 억제하였으며, 보관은 실내온도 25 °C~28 °C, 습도 80%~90%상태로 유지하면서 1, 3, 7, 28일 동안 자연 양생시켰다. 준설햄점과 MF를 혼합하게 되면 흙속에서 MF가 서로 엉키는 현상이 발생하게 되는데, 이때 불균일한 엉킴 현상은 보강 효과를 저감시키는 결과를 야기시키므로 준설햄점과 MF간의 혼합의 균질성이 실험결과에 상당히 중요한 인자로 평가 될 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 실험결과에 오차를 최대한 줄이기 위하여 수(手)작업으로 준설햄점과 MF를 충분히 혼합하여 육안으로 준설햄점 내부에 MF가 균등하게 분포된 것을 확인하여 균질의 시료를 조제하였다.

3.2 다짐시험

MF혼합 준설햄점의 다짐특성을 고찰하기 위하여 해성준설햄점시료를 대상으로 MF의 길이가 서로 다른 2종류(1inch, 2inch)를 노건조 중량비로 준설햄점의 각각 1% 혼합한 것과 고화재로서 WL을 추가로 20% 혼합한 것을 이용하여 KS F2312의 규정에 의거하여 MF의 함유율에 따른 다짐특성의 변화를 검토하기 위하여 A다짐법으로 시험을 실시하였다.

3.3 일축압축시험

직경 5cm, 높이 10cm의 P.V.C 몰드속에 보관된 시료를 각 조건마다 3개씩 일정한 양생기간(1, 3, 7, 28일)이 경과한 후 컷트날로 양단을 매끈하게 절단한 뒤에 추출하고 일축압축 시험장치에 세팅하여 시험을 실시하였다. 준설햄점을 A다짐시험을 통해 구한 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도(γ_{dmax})상태로 조제한 공시체로 일축압축 강도시험을 실시하였다. 울촌 제1지방 산업단지조성 공사장내 준설햄, 매립이 완료되어 10개월이 경과하였을 때 준설햄점의 함수비가 깊이에 따라 다양하게 변화하였으나 표층으로부터 20cm깊이에서 준설햄점의 함수비가 45% 상태였으므로 이 조건에서의 MF혼합에 따른 보강효과를 검토하였다. MF 및 WL의 혼합율을 준설햄점의 노건조 중량비로 여러 종류로 변화시켜 동일조건인 다짐 에너지를 가한 상태에서 조제하였다. 준설햄, 매립이 완료되어 7개월이 경과 하였을 때 준설햄점의 함수비가 75%상태였으므로 이 조건에서 MF의 혼합에 따른 보강효과를 검토하였으며, MF 및 WL의 혼합율은 자연함수비가 45%인 조건과 동일하게 하였다. 또한, 각 시료의 다짐에너지도 동일시하여 공시체를 조제하여 실험을 실시하였다.

3.4 삼축압축시험

삼축압축시험은 압밀종료 후 MF혼합 해성준설햄점의 보강효과를 규명하기 위하여 압밀 비배수시험(CU-Test)을 하였으며, 시료는 준설햄점의 함수비가 45%인 조건을 대상으로 하였다. 시험의 종류는 준설햄

점토와 준설향토에 1inch길이의 MF를 2%와 4%를 혼합한 것, 준설향토에 2inch길이의 MF를 2% 혼합한 것과 준설향토와 1inch의 MF 2% 혼합하고 고화재인 WL을 노건조 중량비로 20% 추가 혼합한 것에 대하여 시험을 실시하였다.

3.5 투수시험

해성준설향토의 MF 혼합에 따른 투수성 변화를 고찰하기 위하여 자연함수비 75% 상태의 시료를 대상으로 KS F2322규정에 의거하여 변수위 투수시험을 실시하였다. 투수시험용 시료는 준설향토, 준설향토에 1inch 및 2inch 길이의 MF를 각각 2%씩 혼합한 경우 및 준설향토와 길이 2inch인 MF를 2% 혼합한 시료에 WL을 20% 추가로 혼합한 조건으로 조제하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Micro-Fiber의 혼합에 따른 다짐 특성 변화

그림 3에는 준설향토와 MF를 혼합한 경우 및 고화재로 WL을 혼합한 경우의 다짐곡선을 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 준설향토의 최대건조밀도(γ_{dmax})는 1.525gf/cm^3 이고 최적함수비(OMC)는 25.8%로 나타난 것에 대하여 준설향토에 MF를 혼합한 경우 길이 1inch 및 2inch 모두 최대건조밀도(γ_{dmax})는 감소하고 최적함수비(OMC)는 증가하는 경향을 보여 주는데, 이는 MF의 낮은 단위중량(비중)과 함께 MF의 신축성에 의한 스폰지 현상 발생으로 인한 다짐에너지의 감소가 영향을 미친것으로 판단된다. 길이 2inch의 MF 혼합재료가, 1inch 혼합재료보다 최대건조밀도(γ_{dmax})와 최적함수비(OMC)가 적게 나타나는 데, 그것은 2inch의 MF가 동일 중량비 1% 상태에서 1inch보다 섬유가 차지하는 부피가 커짐에 따른 단위중량의 감소 영향인 것으로 판단된다. 또한, WL만을 준설향토에 혼합한 경우는 MF 혼합시료에 비하여 높은 γ_{dmax} 값을 나타내나 OMC 값은 유사하며, 준설향토, MF 및 WL의 3종류를 모두 혼합한 경우는 준설향토+MF에 비해서 γ_{dmax} 값은 감소하나 OMC는 큰 변화를 나타내지 않음을 알 수 있으며 이는 WL의 비중이 준설향토에 비해서 낮은 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

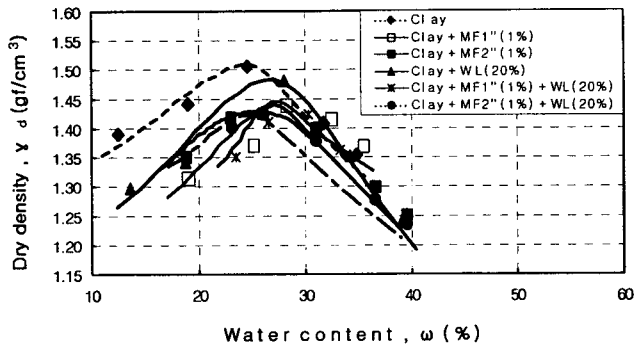


그림 3 Micro-Fiber 혼합 준설향토의 다짐곡선

4.2 해성준설향토의 자연함수비 조건에 따른 강도변화

그림 4에는 울촌 제1지방 산업단지 조성공사 현장의 매립준설향토를 대상으로 매립후 7개월, 10개월이 경과하여 자연함수비가 각각 75%, 45%인 경우와 최적함수비(OMC=25.8%)상태에서 준설향토와 준설향토+MF(1%) 혼합토의 양생일수 1일, 28일의 강도특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 함수비 조건에서 준설향토에 MF를 혼합한 시료는 양생일수 1일에 비하여 28일의 강도가 약 1.5배 크며, 준설향토에 대해서 MF를 혼합한 경우의 강도 역시 1.1~1.8배 크게 나타나고 있다. 준설향토의 자연함수비가 75%로 높은 경우는 양생일수 28일의 일축압축강도 q_{u28} 가 0.091kgf/cm^2 로 극히 낮은 값을 나타내며, 자연함수비가 45%로 약 30% 감소함에 대하여 q_{u28} 이 0.588kgf/cm^2 로 약 6.5배 증가하고 있으며 최적함수비(OMC) 조건의

q_{u28} 은 2.627kgf/cm²로 75% 조건에 대하여 강도가 약 28.8배로 현저하게 증가함을 알 수 있다. 준설풀토에 MF를 혼합한 경우에 대해서도 자연함수비가 감소함에 따라 강도의 증가특성은 준설풀토의 강도증가 특성과 거의 유사한 경향을 나타낸다. 또한, 준설풀토+MF1''(1%)를 양생일수 28일을 기준으로한 경우의 경우 본 현장과 같이 고소성의 해성준설풀토인 경우 연약지반의 기준치인 $q_u=0.5\text{kgf/cm}^2$ 보다 큰 조건의 강도를 나타내기 위해서 준설풀토의 자연함수비가 52% 이하의 조건으로 유지할 필요가 있을 것으로 판단된다.

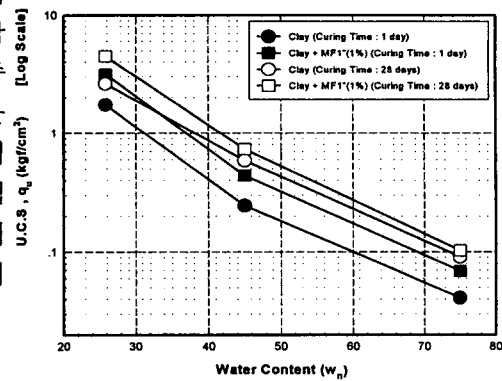


그림 4 준설풀토의 함수비 조건에 따른 강도변화

4.3 양생일수에 따른 강도변화

그림 5에는 해성준설풀토 및 준설풀토+MF의 양생일수 변화에 따른 일축압축강도의 변화를 나타낸다. 제 2장에서 언급한 바와 같이 양생기간 중 시료의 양단에 뿔을 썬워서 방치하였으므로 양생일수 경과에 따른 시료의 함수비의 변화는 없었으며, 단지 텍스토트로피(Thixotropy)현상에 기인된 강도발현 뿐이므로 시료 조제 후 28일 경과시의 강도가 1일 경과시의 강도에 대하여 약 1.5~2.4배 증가함을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 준설풀토의 자연함수비가 높은 경우 낮은 함수비에 비하여 텍스토트로피 현상이 크게 나타남을 알 수 있으며, 시료 조제후 7일까지의 강도증가가 상대적으로 장기적인 강도증가보다 크게 나타났다. MF혼합시 양생일수에 따른 강도증가 특성은 자연함수비 조건에 관계없이 거의 준설풀토와 유사한 경향을 나타내며, MF를 혼합한 경우 동일 양생일수 조건의 준설풀토보다 약 1.4~2.1배의 큰 강도특성을 나타냄을 알았다.

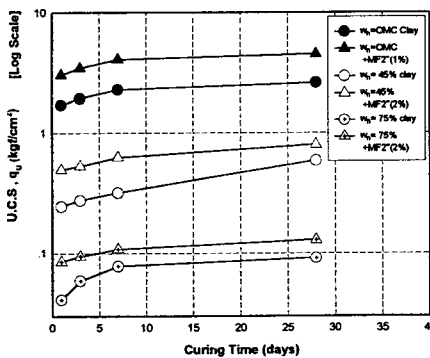


그림 5 양생일수에 따른 강도증가

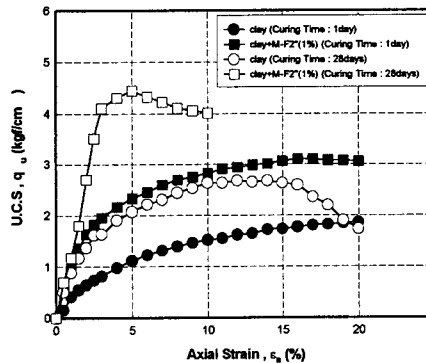


그림 6 최적함수비(OMC)상태의 응력~변형을 곡선

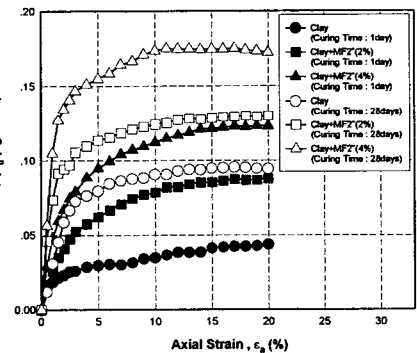


그림 7 자연함수비 75%상태의 응력~변형을 곡선

그림 6, 7에는 최적함수비(OMC) 및 자연함수비 75% 상태의 준설풀토 및 준설풀토와 MF 혼합시료의 양생일수 1일 및 28일의 조건에 대한 응력~변형을 곡선을 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 $w_n=25.8\%$ 로 함수비가 낮은 최적함수비(OMC)상태에서는 준설풀토의 곡선에 비하여 MF를 혼합한 경우에 1일, 28일 모두 강도가 크게 발현됨을 알 수 있으며, 1일 경과시에는 진행성 파괴형상(Progressive failure)을 나타냄에 대하여, 양생일수 28일의 경우에는 준설풀토와 MF혼합점토 모두 취성파괴(Brittle failure)형상을 나타내며, 양생일수 28일에 대해서는 텍스토트로피현상의 발현이 큰 것을 알 수 있다. 그림 7에서 나타내듯이 준설풀토의 자연함수비가 75%로 높은 경우에 대해서는 준설풀토와 MF혼합준설풀토 모두 양생일수 28일에 대해서도 응력~변형을 곡선의 첨두(Peak)강도 산정이 불가능하게 진행성파괴경향을 나타내며 텍스토트로피 발현특성이 낮은 것을 알 수 있다.

4.4 Micro-Fiber의 길이에 따른 강도변화

그림 8(a), (b)는 준설풀토에 MF의 길이가 1inch와 2inch인 2종류의 재료를 대상으로 동일 혼합율을 적용하였을 경우에 길이의 변화에 따른 강도 증가특성을 양생일수 1일, 28일에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 3조건의 함수비 상태에서 모두 MF를 혼합한 경우가 준설풀토의 강도에 비해서 두 조건의 양생일수 1일, 28일 모두에서 크게 나타나고 있으며, MF의 혼합율을 1%, 2%, 4%로 변화시킨 경우 MF의 길이에 따른 강도증가 특성의 차이는 그다지 크지 않다.

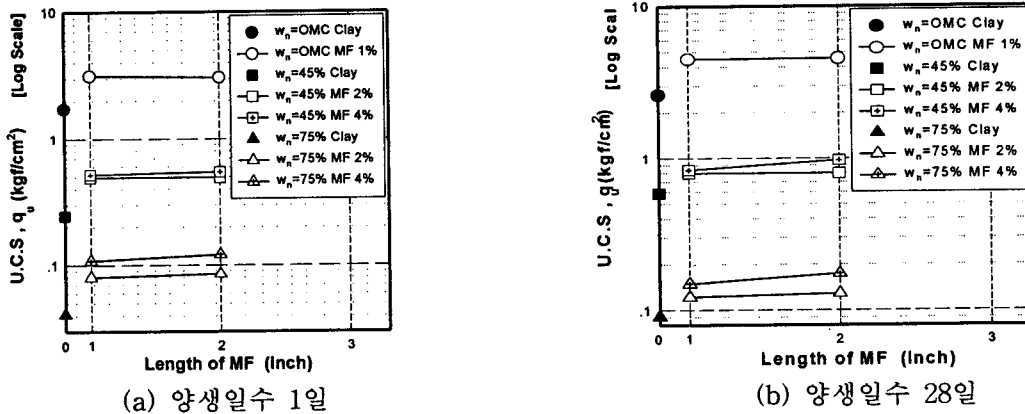


그림 8 Micro-Fiber의 길이변화에 따른 강도변화

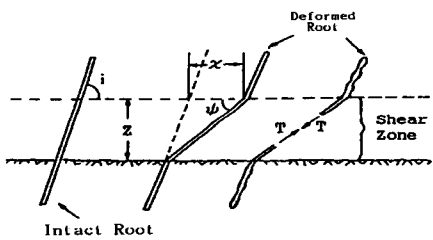
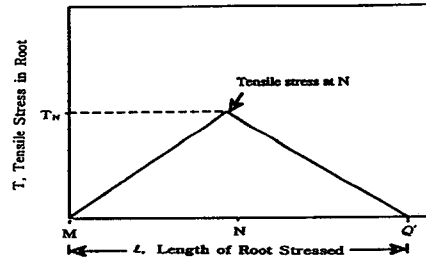


그림 9 임의의 각도(i)로 경사져 있는

섬유의 보강 개념도(Gray & Ohashi, 1983) 그림 10 식물뿌리에 유발된 인장응력 분포(Waldron, 1977)



특히 최적함수비(OMC)조건에서의 강도차이는 무시할 수 있는 조건이며, 준설풀토의 자연함수비가 75%, 45%로 높은 경우 MF의 길이에 따른 강도의 차이가 다소 나타나며, 동일 MF혼합율인 경우에 2inch 길이의 MF를 혼합한 경우가 1inch 길이 혼합한 것보다 약간 큰 강도특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 최적함수비(OMC)조건인 경우 파괴에 도달하는 축방향 변형율이 낮은 값을 나타내어 MF의 길이의 차이에 기인된 인장력(T)의 차이가 미미하다. 그러나, 함수비가 높은 경우에는 파괴시의 변형율이 큰 값을 나타내어 시료의 파괴시 MF가 발휘하는 인장력은 Gray & Ohashi(1983)의 모델에 의한 산정식에 의하면 MF길이의 제곱근에 비례하므로 MF의 길이가 긴 재료를 혼합한 경우에 짧은 것에 비하여 상대적으로 큰 강도특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 9에는 Gray & Ohashi(1983)의 전단면상에 섬유가 임의의 각도(i)로 경사져 있는 경우의 섬유보강모델 개념도를 나타내고 있으며, 그림 10에는 Waldron (1977)의 해석모델에서 제시된 식물 뿌리에 유발된 인장응력 분포를 나타낸다. 그림 10에 나타난 인장응력 분포를 삼각형 분포 또는 포물선 분포로 가정할 경우 Gray & Ohashi (1983)가 제안한 인장력 T를 식으로 나타내면 식 1, 2와 같다. 따라서, 준설풀토의 함수비가 높은 경우에 있어서는 MF의 길이가 긴 것을 쓰는 것이 유리할 것으로 판단된다.

$$\text{삼각형 분포} : T = (4 \cdot \tau' \cdot E_R \cdot Z/D)^{1/2} (\text{cosec } \psi - \text{cosec } i)^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{포물선 분포} : T = \left(\frac{8 \cdot \tau' \cdot E_R \cdot Z}{3D} \right)^{1/2} (\text{cosec } \psi - \text{cosec } i)^{1/2} \quad (2)$$

- 여기서, T : 섬유 길이에 따라 유발되는 인장응력
- τ' : 흙과 식물뿌리의 초기 미끄러짐에 대한 최대 마찰응력
- E_R : 섬유(MF)의 탄성계수
- Z : 전단영역 두께
- D : 섬유(MF)의 직경
- ψ : 섬유(MF)가 전단에 의해 변형된 각
- i : 전단면 상에 섬유(MF)의 임의의 경사각

4.5 Micro-Fiber의 혼합율에 따른 강도변화

그림 11에는 MF의 혼합율에 따른 양생일수 28일에 대한 강도 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 준설점토의 함수비가 최적함수비(OMC)인 상태에서는 MF의 혼합율이 1%로 낮은 경우에 대해서도 강도증가가 약 1.7배로 매우 크게 나타나고 있으며, 함수비가 높은 상태인 45%, 75%에서는 2inch 길이의 MF 혼합을 4%로 높게 할 때에 준설점토 자체강도의 각각 1.65, 1.9배 증가하는 특성을 나타낸다.

MF의 혼합율의 증가에 따른 강도증가특성은 거의 직선적으로 나타남을 알 수 있으나 2inch의 MF 혼합율 2%에 대해서 4%인 경우의 강도가 함수비 45%, 75%에 대해서 각각 1.2배, 1.35배를 나타내어 큰 변화를 보이지 않고 있다. 아울러 MF의 혼합율을 높일 경우 MF가 균질로 준설점토에 혼합하기 곤란하고 MF자체에 영킴현상이 크게 발생하여 비균질의 시료특성을 나타내기 쉬웠다. 따라서, MF의 혼합으로 준설점토를 개량하는 경우 시공성 및 경제성을 고려하여 2%정도로 혼합율을 설정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

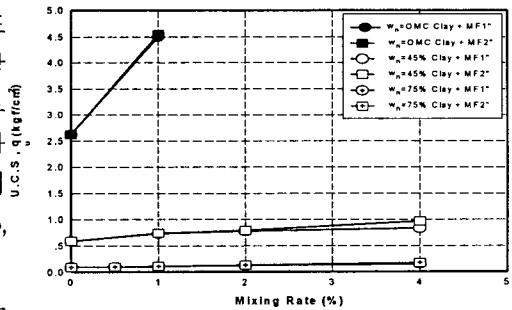


그림 11 Micro-Fiber의 혼합율에 따른 강도변화

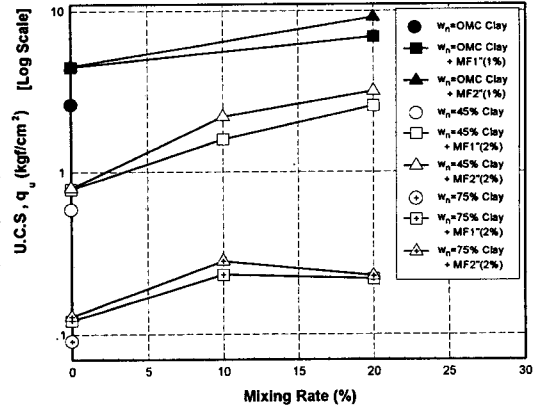
4.6 폐석회 추가 혼합시의 보강효과

해성준설점토의 매립은 해수와 점토의 혼입으로 이루어지기 때문에 함수비를 저하시키는데 많은 노력과 시간을 요하게 된다. 이 때문에 전술한 준설점토와 MF 혼합시료의 시험결과와 같이 매립 후 7개월이 경과하여 자연함수비 75%의 높은 함수비 상태인 경우에도 MF를 혼합하여 보강하면 개량효과는 충분히 나타나는 것이 입증되었다. 그러나, 표층부 개량후 상부구조물 축조시 문제가 발생하지 않도록 연직배수공법 등을 적용하여 원지반 및 준설매립지반을 완전하게 개량하기 위한 중장비 주행 등에 대하여 충분한 지지력을 발휘하는 데는 다소간의 문제점이 있음을 알 수 있다. 따라서, 준설점토 매립지반의 표층부 조기 안정화를 도모하기 위한 방편으로 부산재료인 폐석회(Waste Lime, WL)를 추가로 혼합하여 사용하면 유리할 것으로 판단되어 본 절에서는 환경적으로 무해하며, 그 처리에 곤란을 겪고 있는 WL을 고화재로 활용할 경우의 보강효과를 검토하기로 한다.

그림 12에는 WL의 혼합율이 준설점토의 보강효과에 미치는 영향을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 WL을 추가로 혼합함에 따라 준설점토와 MF를 혼합한 경우에 비하여 강도가 크게 증가되는 것이 확실히 나타나며, 준설점토의 자연함수비가 45%, 75%조건에서 WL을 10% 혼합한 것이 20%를 혼합한 것에 대하여 MF 2inch 길이를 2% 혼합한 경우 각각 0.7배, 1.23배를 나타낸다. 함수비가 높은 상태에 대해서는 강도발현특성이 낮아 다소간의 시험오차도 내포되어 있을 것으로 사료되나 결과적으로 WL의 혼합량을

증가시킴에 따라 강도가 직선적으로 증가되지는 않는다는 사실을 알 수 있다. 이 결과는 신 등(1998)이 인천의 SM (입도가 그림 4.12 폐석회 혼합율이 보강효과에 미치는 영향 불량한 실트질 모래)를 대상으로 본 실험에 이용한 것과 같은 종류의 폐석회를 10%, 20%, 30% 혼합하여 일축압축강도 시험을 실시한 결과 WL 혼합율의 증가에 따라 강도가 직선적으로 증가하지 않고 20% 혼합율일 때 최대의 q_u 치를 나타낸다는 보고와 유사한 특성을 가진다.

본 실험에서 10%의 WL 혼합에서 큰 강도특성을 나타내며, 신 등(1998)은 20% 혼합율에 q_u 치가 최대 값을 나타내어 양자간에 차이가 나타난 것은 대상 준설토의 함수비, 입도 및 광물분석 등 공학적인 특성의 차이에 기인된 현상이라고 판단되며, 본 실험에서 사용한 시료와 같이 고소성의 준설토(CH)인 경우 혼합율은 10%로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.



4.7 압밀비배수(CU) 삼축시험에 의한 강도특성

해성준설토지반에 지반개량공법을 적용하여 개량이 종료된 시점에서의 MF 및 WL의 보강효과를 규명하기 위하여 자연함수비 45%의 조건에서 준설토, 3조건의 MF를 혼합한 준설토 및 준설토에 MF 및 WL을 동시 혼합한 시료들을 대상으로 압밀비배수(CU) 삼축시험을 실시하였다.

4.7.1 응력~변형율~간극수압 관계

그림 13, 14에는 압밀압력 1kgf/cm², 2kgf/cm², 4kgf/cm²의 조건에 대하여 MF의 길이별, MF의 혼합율별 응력~변형율~간극수압의 관계를 각각 나타낸다. 그림 13에서 알 수 있듯이 준설토에 MF를 혼합한 경우 CU시험결과 축차응력(q) 및 간극수압(u) 모두 준설토보다 크게 나타나는 경향이 있으나, 2inch 길이의 MF를 2% 혼합한 경우에는 같은 양의 1inch 길이를 혼합한 경우보다 높은 강도특성을 나타내며, 1inch 길이의 MF를 2% 혼합한 경우에 압밀조건 2kgf/cm², 4kgf/cm²에서는 준설토 자체보다 약간 낮은 강도특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 1inch 길이의 MF를 2% 혼합하는 경우 준설토의 표층개량효과는 거의 없음을 알 수 있다. 그림 14에서 알 수 있듯이 MF의 혼합율이 증가할수록 강도도 증가하나, 지반개량 종료 후 보강효과를 거양하기 위해서는 1inch 길이의 MF를 혼합하는 경우 4% 이상의 혼합율이 요망된다.

4.7.2 응력경로

그림 15, 16에는 압밀압력 1kgf/cm², 2kgf/cm², 4kgf/cm²의 조건에 대하여 MF의 길이별, MF의 혼합율별 및 유효응력경로(Effective Stress Path)를 각각 나타낸다. 그림 15에는 준설토에 1inch, 2inch 길이의 MF를 각각 2%씩 혼합한 경우의 유효응력경로를 나타내며, 전반적으로 유사한 응력경로 특성을 나타내며 3종의 시료 모두 진행성과의 경향을 나타내므로 축방향 변형율(ϵ_1)이 15%인 상태에서의 M값을 산정한 결과 ①준설토 ②준설토+MF 1inch(2%) 및 ③준설토+MF 2inch(2%)에 대하여 각각 1.20, 1.21, 1.50을 나타내어 압밀종료 후 상태에서 2inch 길이의 MF를 2% 혼합한 경우에는 보강효과가 크게 나타나는 것에 대하여 1inch 길이의 MF를 2% 혼합한 경우에는 준설토만의 강도와 거의 유사한 값을 나타내어 보강효과가 거의 없음을 알 수 있다. 그림 16에는 MF의 혼합율을 증가시킨 경우의 응력경로를 검토한 것을 나타내며 ①준설토 ②준설토+MF 1inch(2%) ③준설토+MF 1inch(4%)의 경우 M값이 각각 1.20, 1.21, 1.60을 나타내어 준설토에 MF의 혼합율을 증가시킬수록 보강효과가 커짐을 알 수 있다.

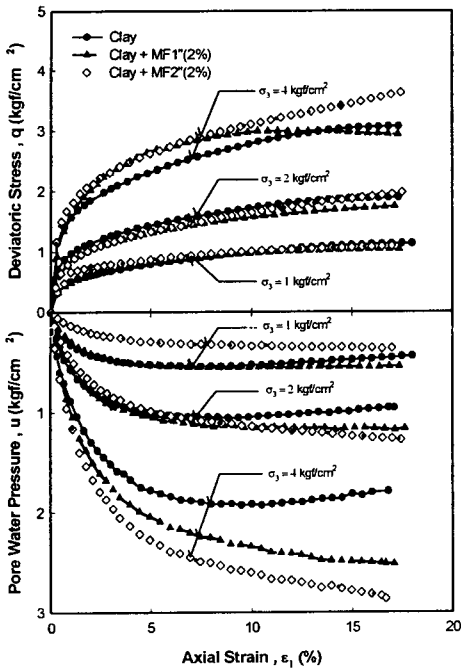


그림 13 Micro-Fiber 길이별 응력~변형률~간극수압 관계

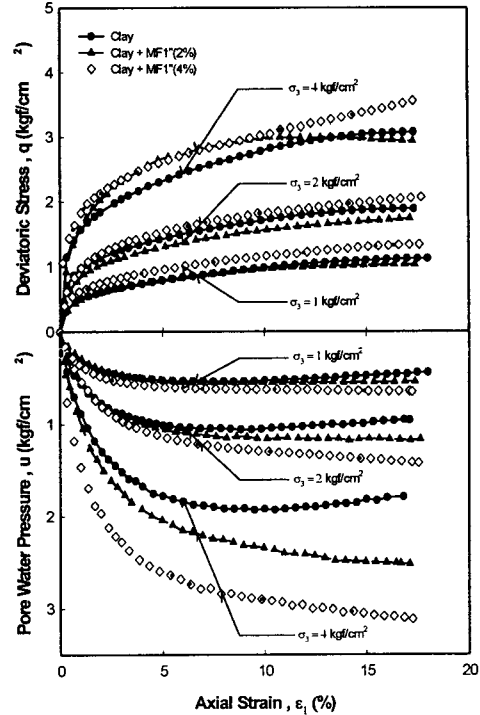


그림 14 Micro-Fiber 혼합율별 응력~변형률~간극수압 관계

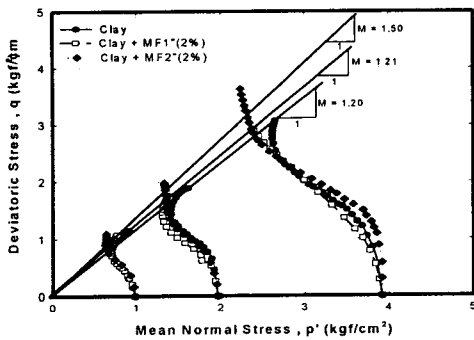


그림 15 Micro-Fiber 길이별 유효응력경로

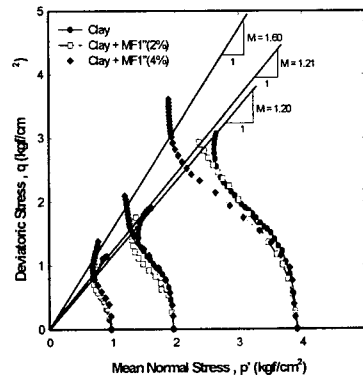


그림 16 Micro-Fiber 혼합율별 유효응력경로

5. 결론

토질특성이 불량한 고소성의 해성준설점토를 보강하기 위하여 Micro-Fiber(MF)를 혼합하여 다양한 실내시험을 실시하였으며, 고화재로 폐석회(WL)를 추가 혼합하여 각종 실내시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 해성준설점토에 MF를 혼합한 경우에는 최대건조밀도(γ_{dmax})는 감소하며 최적함수비(OMC)는 증가하는 특성을 나타냈으며, 폐석회를 추가로 혼합한 경우에는 γ_{dmax} 는 감소하나 OMC의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.
2. MF의 혼합에 따른 강도증가비는 준설점토의 자연함수비가 상이함과 무관하게 약 1.5이며, 혼합 후 양생일수 7일까지의 강도증가가 7일 이후에 비하여 상대적으로 크게 나타났다.
3. 준설점토에 혼합된 MF의 길이에 따른 보강효과를 검토한 결과 MF길이 1inch, 2inch에 대하여 최적함수비 조건에서는 그 차이는 무시할 수 있을 정도이며, $w_n = 45\%$, 75% 로 고함수비인 경우에는 길

이가 긴 MF의 보강효과가 크게 나타났다.

4. MF의 혼합율이 증가할수록 준설점토의 보강효과는 증대되나 그 차이는 크지 않으며, 혼합을 증가시 MF의 영킴현상이 증대되는 특징을 나타내므로 경제성, 시공성을 고려하여 MF의 혼합율은 2% 정도로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
5. 준설점토의 함수비가 액성한계 이상의 높은 상태에서는 MF 혼합만으로 중장비 주행이 가능한 보강 효과를 기대하기가 부족하여 추가적으로 고화재인 폐석회를 약 10% 혼합한 경우 충분한 보강효과가 나타남을 확인하였다.

6. 참고문헌

1. (주)동양화학공업, (1998) “부산석회(폐석회) 개요” pp. 1~6.
2. 박동찬, 박경호(1997), “울촌 제1지방공단조성공사”, 대한토목학회지, 제45권, 제7호, pp. 50~61.
3. 신은철, 오영인, 최찬용, 김성환, 홍승서, 강욱현(1997), “부산석회를 활용한 해안매립지 성토재 개발에 관한 연구” 시립인천대학교, 연구보고서, pp. 10~40.
4. 신은철, 오영인, 강욱현(1998), “준설토/폐석회로 구성된 매립의 지지력 및 침하에 관한 연구” 한국지반공학회지, '98 가을 학술발표회 논문집, pp. 359~366.
5. 한국건설기술연구원 (1994), “纖維混合 補強土 研究”, pp. 1~ 101.
6. Gray, D.H. and Ohashi, H.(1983), “Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand”, J. of Geotech. Engrg. ASCE, 109(3), pp. 335~353.
7. Synthetic Industries Inc. (1993), “Fibrillated Polypropylene Fibers for Soil Reinforcement”, pp. 3~12.
8. Waldron, L. J. (1977), “Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil”, Soil Science Society America J., 41(5), pp. 843~849.