

Micro-Fiber 혼합에 의한 준설해성점토의 보강효과

Reinforcing Effect of Dredged Marine Clay Mixed with Micro-Fiber

박 영 목*¹ Park, Yeong-Mog

우 문 정*² Wu, Moon-Jung

허 상 목*³ Huh, Sang-Mog

정 연 인*⁴ Chung, Yeon-In

Abstract

To investigate the reinforcing effect of subsurface layers of marine dredged clay(DMC) mixed with the micro-fiber(MF), a series of laboratory tests were performed on the DMC specimens with and without MF through uniaxial and triaxial compression tests. For the test programme, the elapsed time after dredging of marine clay, mixing rate and length of MF, and curing time of the composite were chosen as the important factors affecting the strength behaviour. The strength of the DMC mixed with MF and waste lime(WL) used for the admixture was found to be enhanced with the increasing content and length of MF, and with decreasing water content of DMC. MF and WL were applied as materials for trafficability improvement of the very soft reclaimed ground by DMC.

요 지

초연약 고소성의 준설해성점토를 보강하기 위하여 Micro-Fiber(MF)재를 혼합하여 다양한 실내시험을 수행하였다. 준설점토의 함수비를 3종으로 조정하고 각각의 시료에 MF를 길이와 혼합율을 변화시키면서 일축압축 및 삼축압축 시험을 통하여 보강특성을 검토하였다. 또한, 양생일수별로 강도증가 경향을 평가하였으며, 폐석회(Waste Lime, WL)의 추가혼합이 보강기능을 증대시키는지 여부를 검토하였다. 실험결과, MF를 혼합함에 따라 준설점토의 강도가 자연함수비에 무관하게 약 50% 증가하였으며, MF의 길이가 길수록 보강효과가 크게 나타났다. 또한, 합리적인 MF의 혼합율은 2% 정도이며, 추가적으로 폐석회를 약 10% 혼합할 경우 증장비주행이 가능한 보강효과가 나타나는 것을 확인하였다.

Keywords : Dredged clay, Micro-Fiber, Mixing rate, Reinforcing effect, Waste lime, Water content

1. 서 론

좁은 국토 면적을 가진 우리 나라는 고도의 산업발전과 급격한 인구증가에 편승하여 산업시설 부지 조성 등의 국토확장이 절실하게 요망된다. 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있는 지형 특성상 국토의 효율적인 확장은 서, 남해안의 천해를 대상으로 이루어지는 것이 바람직한 것

으로 판단된다. 또한, 우리나라의 서, 남해안은 해저구배가 완만함과 동시에 간만의 차가 커서 간척매립사업을 수행할 경우 매우 유리한 조건을 가지고 있으며, 지금까지 간척 매립사업이 활발히 추진되고 있다. 해안매립사업의 재료로서 초기단계에서는 산토와 모래 등을 많이 이용하였으나 운반비용 및 환경훼손 등의 문제가 발생하고, 해안매립공사 수행시 항로의 준설이

*1 영남대학교 공과대학 토목도시환경공학부 부교수 (Associate Prof., School of Civil, Urban & Environmental Engr., College of Engr., Yeungnam Univ., ympark@yumail.ac.kr)

*2 영남대학교 공과대학 토목도시환경공학부 교수 (Prof., School of Civil, Urban & Environmental Engr., College of Engr., Yeungnam Univ.)

*3 계명대학교 공과대학 건설시스템공학부 강사 (Instructor, Dept. of Civil Engr., College of Engr., Keimyung Univ.)

*4 계명대학교 공과대학 건설시스템공학부 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil Engr., College of Engr., Keimyung Univ.)

수반되는 경우도 많으며 그렇지 않은 경우에도 인근의 해저에 퇴적된 토사를 준설하여 매립재로 사용하는 것이 경제성측면에서 매우 유리하기 때문에 최근에는 이 방법의 적용이 크게 증가되고 있다. 이 경우에 대부분의 준설토사가 해성점토이다. 해성점토를 매립재로 사용하는 경우 매립지반은 지지력이 부족하여 건설장비의 진입이 곤란한 등의 문제점을 내포하고 있다. MF를 건설잔토에 혼합하여 개량한 연구는 한국건설연구원(1994)에서 심도 깊게 수행된 실적이 있으나 초연약 해성준설점토의 개량에 대해서는 구체적으로 검토한 실적이 없는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 표층개량공법이 제안되어 있으나 본 연구에서는 준설점토에 일정량의 Micro-Fiber(MF)재를 혼합하여 초연약 매립지반의 개량가능성을 검토하였다. 또한 본 연구에서는 해성준설점토 매립지반의 효율적인 개량을 위하여 대표적인 고소성의 해성 준설점토(CH)를 대상으로 함수비 상태에 따라 Micro-Fiber(MF)의 길이와 혼합율을 변화시키면서 실내시험을 실시하여 양생일수별 보강효과를 검토함과 동시에 폐석회(Waste Lime, WL)를 고화재로 활용하는 등의 다양한 시험을 실시하여 Micro-Fiber 혼합에 의한 해성 준설점토의 보강효과를 검토하였다.

2. 시험시료의 물리적 성질

본 실험에서 사용한 시료는 전남 광양에 소재한 울촌제 1 지방공단 조성공사현장에서 준설, 매립을 완료하여 7개월이 경과한 후에 해성점토이다. 준설점토는 채취시의 함수비(w_n)가 75%이며, 비중(G_s)이 2.66이고, 액성한계(w_L)가 65%, 소성한계(w_p)가 31.5%이고, 최대건조밀도(γ_{dmax})가 1.525gf/cm^2 , 최적함수비(OMC)가 25.8%이며 통일분류법상 고소성의 점토(CH)를 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 Micro-Fiber(MF)는 미국의 Synthetic Industries사 제품으로 길이 1inch, 2inch의 두 종류가 있으며, 이들은 수개의 격자형상을 갖추며 하나의 선형으로 구성되어 있다. 2inch 길이의 MF는 1inch의 것보다 유연성이 크고, 자연상태에서 영킴 현상이 크게 나타나는 특성을 가지고 있다. 고화재로 사용한 폐석회(Waste Lime, WL)는 인천동양화학공업(주)에서 소금(2NaCl)과 석회석(CaCO_3)을 반응시켜 생산하는 소다회(Na_2CO_3)의 부산물로 발생한 재료이다((주)동양화학공업, 1998).

3. 실험조건 및 방법

해성준설점토에 MF의 혼합에 따른 보강효과를 검토하기 위하여 각종 시료를 조제하여 실내시험을 실시하였다. 다짐시험(A다짐)용 시료는 자연 상태의 해성준설점토를 공기건조 상태에서 나무망치를 이용하여 잘게 부수어 사용하였으며, MF 및 WL은 노건조 상태의 시료를 적정 중량비로 준설점토에 혼합하여 사용하였다. 공시체는 다짐시험을 통해 구한 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도(γ_{dmax}) 상태로 조제하였으며, 준설매립후 7개월이 경과한 상태의 자연함수비가 75%, 10개월이 경과한 상태인 자연함수비가 45%인 조건에서 각 시료에 대하여 동일한 다짐에너지를 가하여 시료를 조제하였다. 강도시험용 공시체는 직경 50mm, 높이 100mm인 KS제품인 PVC 파이프를 시료성형 몰드로 사용하였으며, 몰드의 상단과 하단을 램으로 씌워서 함수비의 변화를 최대한 억제하였으며, 보관은 실내온도 $25^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$, 습도 80%~90% 상태로 유지하면서 1, 3, 7, 28일간 자연양생시켰다. 준설점토와 MF를 혼합하게 되면 흙속에서 MF가 서로 엉키는 현상이 발생하게 되는데, 이때 불균일한 영킴 현상은 보강 효과를 저감시키는 결과를 야기시킨다(한국건설기술연구원, 1994). 따라서 본 실험에서는 준설점토와 MF간의 혼합의 균질성이 확보될 수 있도록 수(手)작업으로 준설점토와 MF를 충분히 혼합하여 육안으로 준설점토 내부에 MF가 균등하게 분포된 것을 확인하여 균질의 시료를 조제하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 1에는 준설점토와 MF를 혼합한 경우 및 고화재로 WL을 혼합한 경우의 다짐곡선을 각각 나타내었다. 준설점토에 MF를 혼합한 경우 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 미친 것으로 판단된다. 또한, 동일 혼합율을 가진 MF에서 1inch 길이의 MF에 비하여 2inch 길이의 MF가 γ_{dmax} 및 OMC값이 모두 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 아울러, WL만을 준설점토에 혼합한 경우는 MF 혼합시료에 비하여 높은 γ_{dmax} 값을 나타내나 OMC 값은 유사하며, 준설점토, MF 및 WL의 3종류

를 모두 혼합한 경우는 준설풀토+MF에 비해서 γ_{dmax} 값은 감소하나 OMC는 큰 변화를 나타내지 않음을 알 수 있으며, 이는 WL의 비중이 준설풀토에 비해서 낮은 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 2에는 해성준설풀토 및 준설풀토+MF의 양생일수 변화에 따른 일축압축강도의 변화를 나타내었다. 양생기간 중 시료의 양단에 뿔을 씌워서 방치하였으므로 양생일수 경과에 따른 시료의 함수비의 변화는 없었으며, 단지 틱소트로피(Thixotropy)현상에 기인된 강도발현 뿐이므로 시료조제 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 틱소트로피 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 3에 준설풀토에 MF의 길이가 2종류(1inch, 2inch)인 재료를 대상으로 동일 혼합율을 적용하였을 경우에 길이의 변화에 따른 강도 증가특성을 양생일수 1일, 28일에 대하여 나타내었다. 모든 조건에서 MF를 혼합한 경우가 준설풀토의 강도에 비해서 크게 나타나고 있으며, MF의 혼합율을 1%, 2%, 4%로 변화시킨 경우에도 MF의 길이에 따른 강도증가 특성의 차이는 그다지 크지 않다. 최적함수비(OMC)에서 강도차이는 무시할 수 있고, 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 MF 길이차에 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

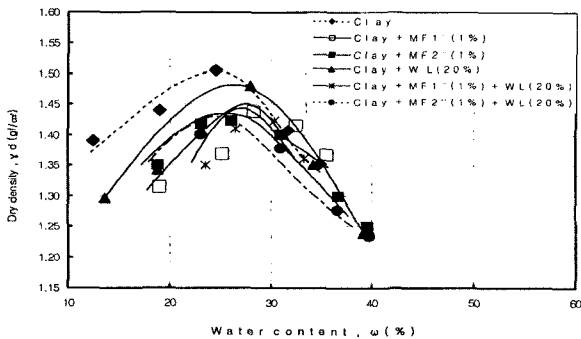


그림 1. Micro-Fiber 혼합 준설풀토의 다짐곡선

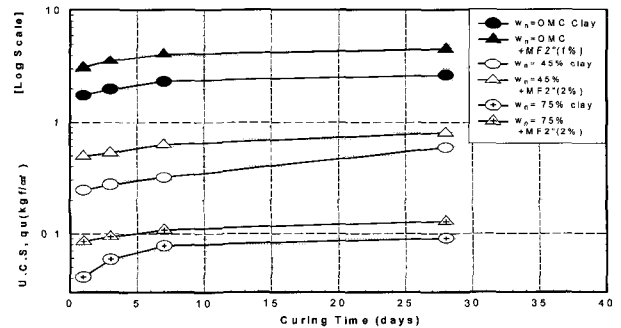
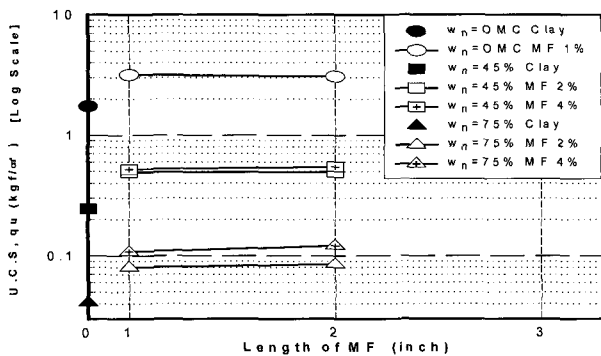
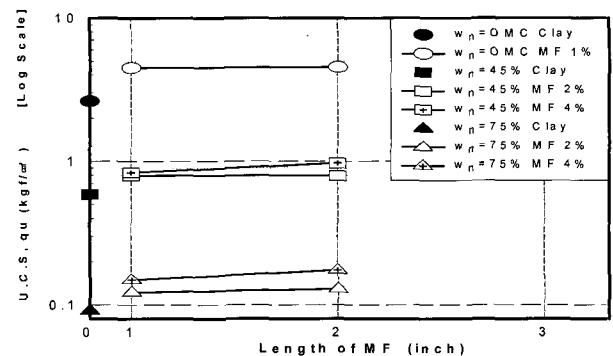


그림 2. 양생일수에 따른 강도증가



(a) 양생일수 1일



(b) 양생일수 28일

그림 3. Micro-Fiber의 길이변화에 따른 강도변화

것에 비하여 상대적으로 큰 강도특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

그림 4에 MF의 혼합율에 따른 양생일수 28일에 대한 강도변화를 나타내었다. 준설점토의 함수비가 최적함수비(OMC)인 상태에서는 MF의 혼합율이 1%로 낮은 경우에 대해서도 강도증가가 약 1.7배로 매우 크게 나타나, 함수비가 높은 상태인 45%, 75%에서는 2inch 길이의 MF 혼합율 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 영김현상이 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 5에 WL의 혼합율이 준설점토의 보강효과에 미치는 영향을 나타내었다. WL을 추가로 혼합함에 따라 준설점토와 MF를 혼합한 경우에 비하여 강도가 크게 증가되는 것이 확실히 나타난다. 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 신은철 등(1998)이 인천의 SM(입도가 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, 신은철 등(1998)은 20% 혼합율에 q_u 치가 최대값을 나타내어 양자간에 차이가 나타난 것은 대상 준설토의 함수비, 입도 및 광물분석 등 공학적인 특성의 차이에 기인된 현상이라고 판단되며, 본 실험에서 사용한 시료와 같이 고소성의 준설점토(CH)인 경우 WL의 혼합율은 10%로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 6에 WL 혼합시 MF의 길이를 1inch와 2inch로 변화시켜 동일 중량으로 혼합한 경우 보강효과에 미치는

영향을 양생일수 28일의 강도를 기준으로 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 준설점토에 MF만 혼합한 경우에 비하여 WL이 추가로 혼합된 경우 길이가 2inch로 긴 MF를 혼합한 상태의 강도가 1inch를 혼합한 조건보다 약간 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 전술된 바와 같이 준설매립지반 조건에서 MF는 WL의 혼합여부에 무관하게 길이가 길수록 유리한 것으로 판단되므로 현장에서는 가능한 2inch 길이의 MF를 사용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

준설매립점토의 일축압축강도(q_u)를 산정함에 있어

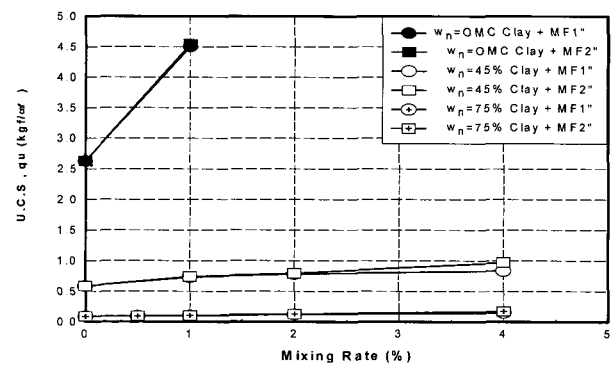


그림 4. Micro-Fiber의 혼합율에 따른 강도변화

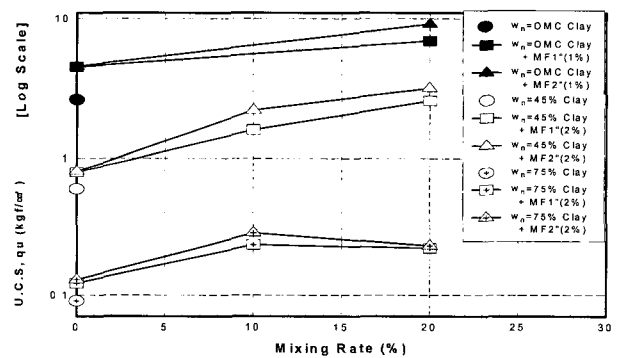


그림 5. 폐석회 혼합율이 보강효과에 미치는 영향

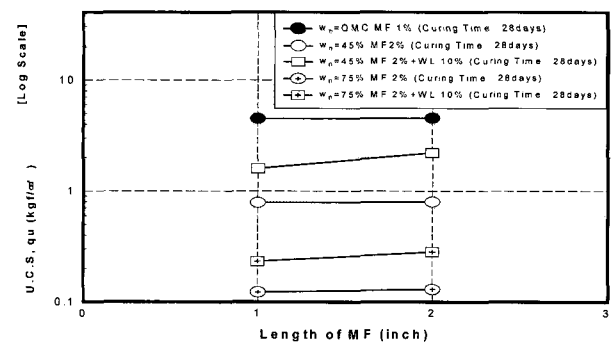


그림 6. 폐석회 추가 혼합시 Micro-Fiber의 길이가 보강효과에 미치는 영향

서 진행성과파괴의 특성을 나타내므로 15%의 변형율에 해당하는 강도를 파괴강도라고 하고 q_u 를 산정하였으나 현장조건을 고려하여 미소변형($\epsilon_1=5\%$)에 대한 MF와 WL의 보강효과를 검토하는 것이 필요할 것으로 사료되어 양생일수 및 MF 혼합율에 따른 미소변형시 강도특성을 파악하였다.

그림 7에 축변형율 5%에 해당하는 미소변형에 대한 양생일수별 강도증가 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 준설점토의 자연함수비가 높은 75% 조건에서는 양생일수에 따른 강도증가가 상대적으로 크게 나타나며, 자연함수비가 낮아질수록 미소변형조건에서의 양생일수에 따른 강도증가 특성이 상대적으로 작아지는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

그림 8에 준설점토의 최적함수비(OMC) 25.8%와 자연함수비 45%, 75%에 대하여 MF의 혼합율을 변화시키면서 미소변형($\epsilon_1=5\%$)시 강도특성을 나타내었다.

준설점토가 최적함수비(OMC) 조건인 경우 MF의 혼합율이 1%인 경우 미소변형시의 강도가 준설점토의 강도에 비하여 1.6~2.1배 증가하며, 함수비가 상대적으로 높은 45%, 75%의 경우에는 MF의 혼합율이 4%인 경우 q_u 치가 미혼합조건에 약 2배를 나타냄을 알 수 있다.

이와 같이 함수비가 높은 조건에 대해서는 MF 혼합율의 증가에 따른 q_u 의 증가가 미미하며 전술한 파괴상태의 일축압축강도와 거의 유사한 특성을 나타낸다. 또한 모든 함수비 조건에 대해서 2inch 길이의 MF를 혼합한 것이 동일중량의 1inch 길이의 MF를 혼합한 것보다 모든 혼합율에 대해서 다소 큰 강도특성을 나타냄을 알 수 있다.

그림 9에 준설점토에 1inch, 2inch 길이의 MF를 각각 2%씩 혼합한 경우의 유효응력경로를 나타내었으며, 전반적으로 유사한 응력경로 특성을 나타내며 3종의 시료 모두 진행성과파괴 경향을 나타내었다. 압밀종료 후 상태에서 2inch 길이의 MF를 2% 혼합한 경우에는 보강효과가 크게 나타나는 것에 대하여 1inch 길이의 MF를 2% 혼합한 경우에는 준설점토만의 강도와 거의 유사한 값을 나타내어 보강효과가 거의 없음을 알 수 있다.

그림 10에 MF의 혼합율을 증가시킨 경우의 응력경로를 검토한 것을 나타내었으며 ①준설점토 ②준설점토+MF 1inch(2%) ③준설점토+MF 1inch(4%)의 경우 M값이 각각 1.20, 1.21, 1.60을 나타내어 준설점토에

MF의 혼합율을 증가시킬수록 보강효과가 커짐을 알 수 있다.

그림 11에 WL을 혼합한 경우의 유효응력경로를 추

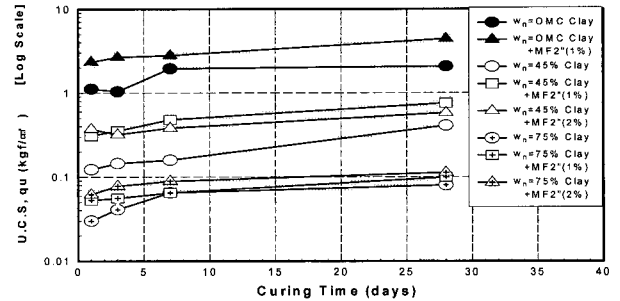


그림 7. 양생일수에 따른 미소변형에 대한 강도변화

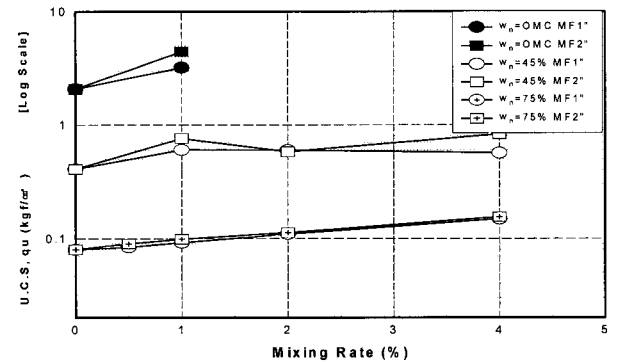


그림 8. Micro-Fiber 혼합율에 따른 미소변형시 강도특성

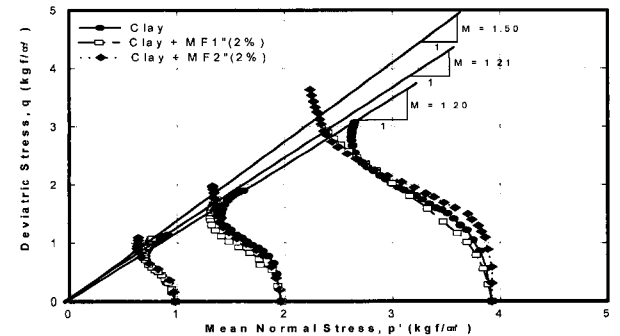


그림 9. Micro-Fiber 길이별 유효응력경로

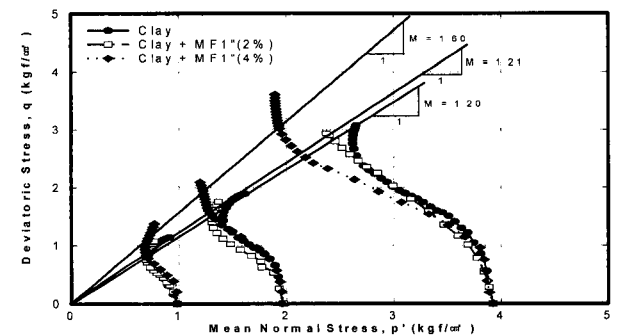


그림 10. Micro-Fiber 혼합율별 유효응력경로

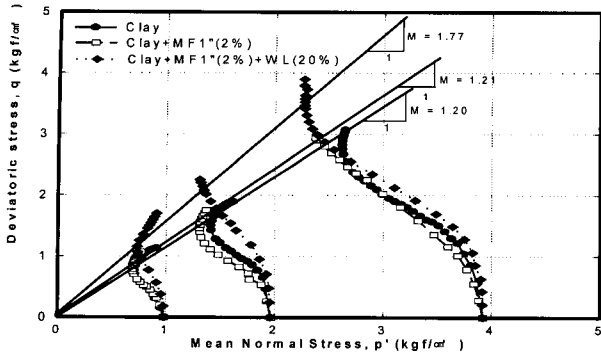


그림 11. Micro-Fiber 및 폐석회 혼합시 유효응력경로

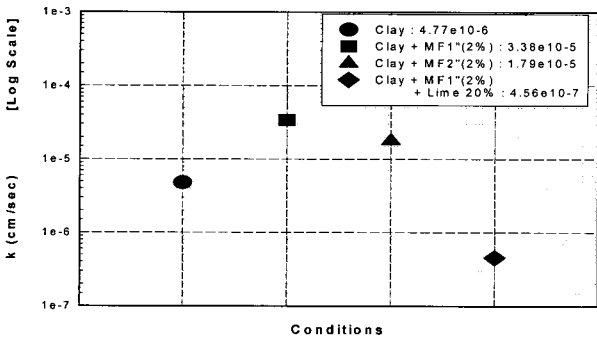


그림 12. Micro-Fiber 및 폐석회 혼합에 따른 투수계수 변화

가하여 나타냈으며 WL을 20% 혼입한 경우에 유효응력 경로가 다소 우측으로 이동되는 특성을 나타냄을 볼 때 전단과정중 간극수압의 발생이 축차응력 증가분에 대하여 상대적으로 낮게 발현됨을 알 수 있고, 준설점토에 MF와 20%의 WL을 혼합한 경우 $M=1.77$ 을 나타내어 큰 강도발현 특성을 가짐을 알 수 있으며, 보강효과가 현저한 것으로 판단된다.

해성준설점토에 MF 및 WL을 혼합한 경우에 투수성의 변화를 검토하기 위하여 자연함수비가 75%인 경우의 준설점토, 준설점토+MF(1inch 및 2inch) 및 준설점토+MF+WL의 4조건에 대해서 변수위 투수시험을 실시하였다.

그림 12에 4종의 각 조건에 대한 투수계수값을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 준설점토의 투수계수는 $4.77 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 를 나타냈으며 준설점토에 길이 1inch, 2inch의 MF를 중량비로 2% 혼합한 경우에 투수계수는 준설점토보다 각각 7.1배, 3.8배 증가한 값을 나타냈다.

MF가 혼합된 경우 준설점토의 투수계수값이 크게 나타나는 것은 경계면의 다짐시 발생하는 스폰지현상으로 인한 다짐성 저하와 MF와 준설점토의 부착면에 유

로형성의 가능성 등에 의한 것으로 판단된다. MF를 혼합한 준설점토의 투수계수가 크게 나타나는 결과는 준설점토의 간극수 배제속도의 증대로 준설점토의 압밀 촉진 효과를 거양할 수 있을 것으로 사료된다.

동일한 MF량을 혼합한 경우 MF의 길이가 1inch의 경우가 2inch보다 약 2배 높은 투수계수를 나타냄을 알 수 있다. 이는 길이별 MF재료의 특성에 기인되는 것으로 판단된다. 즉 1inch의 MF는 2inch보다 상대적으로 큰 재료의 강성을 가지기 때문에 준설점토와 혼합시 2inch의 MF에 비하여 영킴현상이 상대적으로 적게 발생하여 투수로 형성에 1inch의 MF가 유리하기 때문인 것으로 판단된다.

WL을 20% 추가로 혼합한 경우에는 투수계수가 $4.56 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 로 준설점토 자체의 투수계수보다 낮은 값을 나타내며, 이 결과는 신은철 등(1997)이 침전된 상태의 폐석회 시료를 대상으로 투수계수를 측정하여 $4.76 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 를 나타낸다고 보고한 것과 같이 WL 자체의 투수성이 낮으며, 준설점토와 WL의 혼합에 따라 간극이 감소된 영향인 것으로 판단된다.

5. 결론

토질특성이 불량한 고소성의 해성준설점토를 보강하기 위하여 Micro-Fiber(MF)를 혼합하여 실내시험을 실시함과 동시에 폐석회(WL)를 고화재로 혼합하여 실내시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MF의 혼합에 따른 강도증가비는 준설점토의 자연함수비가 상이함과 무관하게 약 1.5이며, 혼합 후 양생일수 7일까지의 강도증가가 7일 이후에 비하여 상대적으로 크게 나타났다.
- (2) 준설점토에 혼합된 MF의 길이 1inch, 2inch에 대하여 최적함수비 조건에서는 그 차이는 무시될 정도이며, $w_n = 45\%$, 75% 로 고함수비인 경우에는 길이가 긴 MF의 보강효과가 크게 나타났다.
- (3) MF의 혼합율이 증가할수록 준설점토의 보강효과는 증대되나 그 차이는 크지 않으며, 혼합율 증가시 MF의 영킴현상이 증대되는 특징을 나타내므로 경제성, 시공성을 고려하여 MF의 혼합율은 2%정도로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 준설점토의 함수비가 액성한계 이상의 높은 상태에서는 MF 혼합만으로 증장비 수행이 가능한 보강효

과를 기대하기가 부족하여 추가적으로 고회재인 폐 석회를 약 10% 혼합한 경우 충분한 보강효과가 나타남을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 주)동양화학공업, “부산석회(폐석회)개요”, pp.1-6, 1998.
2. 신은철, 오영인, 강옥현, “준설토/폐석회로 구성된 매립의 지지력 및 침하에 관한 연구”, 한국지반공학회지, '98 가을 학술발표회 논문집, pp.359-366, 1998.
3. 신은철, 오영인, 최찬용, 김성환, 홍승서, 강옥현, “부산석회를 활용한 해안매립지 성토재 개발에 관한 연구”, 인천대학교 연구보고서, pp.10-40, 1997.
4. 한국건설기술연구원, “섬유혼합 보강토 연구”, pp.1-104, 1994.
5. Gray, D.H. and Ohashi, H., “Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand”, *J. of Geotech. Engrg.* ASCE, 109(3), pp.335-353, 1983.

(접수일자 2002. 12. 16, 심사완료일 2003. 5. 6)