

열-화학적 인자를 고려한 복층터널의 지반-토목섬유의 접촉면 전단거동

장동인¹ · 곽창원² · 박인준^{3*}

¹정회원, 한서대학교 대학원 토목공학과

²정회원, 한국지역난방기술 토건설계그룹

³정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

Dynamic shear behavior of geosynthetic-soil interface considering thermal-chemical factors

Dong-In Jang¹, Chang-Won Kwak², Inn-Joon Park^{3*}

¹Student Member, Department of Civil Engineering, Hanseo University

²Ph.D Candidate, Civil&Architecture Design Group, Korea District Heating Engineering Co.Ltd

³Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

ABSTRACT: The needs for the utilization of space in the urban area due to the increasing population and traffic volume. A Double-deck tunnel can be an appropriate solution. Geosynthetics are inevitably installed between ground and tunnel lining, therefore, geosynthetic-soil interface is also comprised. Dynamic shear behavior of geosynthetic-soil interface affects the dynamic behavior of tunnel, and experimental study is required since the behavior is very complicated. In this study, chemical factors such as acid and basic element in the groundwater and temperature are considered in the laboratory test. Multi-purpose Interface Apparatus(M-PIA) is utilized and submerging periods are 60 and 960 days. Consequently, dynamic shear degradation of geosynthetic-soil interface considering chemical and thermal factors are verified.

Keywords: Chemical factors, Cyclic simple shear tests, Soil-geosynthetic interface, Dynamic shear behavior, Waste landfill

초 록: 최근 제한된 국토 면적에 비해 늘어나고 있는 인구와 그에 따른 교통량 증가에 따라 효율적인 공간 이용의 필요성이 급증하고 있다. 이를 위하여 여러 가지 지하구조물 건설이 증가하고 있으며, 그 중 대표적인 것이 복층터널이다. 복층터널 건설시 터널 라이닝과 주위 지반이 접촉하게 되고, 그 사이에 차수, 보호 또는 지반보강의 목적으로 토목섬유를 시공하게 된다. 따라서 필연적으로 지반-토목섬유 접촉면이 형성되어 터널의 전단 거동에 큰 영향을 미치게 되며, 특히 지진과 같은 동적하중 재하시 그 거동은 매우 복잡해지므로 실험적 접근이 필수적이다. 본 연구에서는 터널 주위지반의 지하수 내 산성 및 중성과 같은 화학적 성분이 반복 전단하중 상태에서 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소에 미치는 영향을 실내 시험을 통하여 분석하였다. 또한 여러 가지 요인에 의하여 형성되는 지중 온도차를 고려하기 위하여 시료의 온도를 20°C와 40°C로 설정하여 온도에 의한 접촉면의 동적 전단특성을 고려하였다. 이를 위하여 접촉면 동적전단시험기를 이용하고 60일, 960일간 수침시킨 토목섬유와 흙 시료를 이용하여 반복 단순전단시험을 수행하였고, 그 결과를 교란상태개념을 이용하여 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소 특성을 확인하였다.

주요어: 복층터널, 반복단순전단시험, 토목섬유-흙 접촉면, 동적전단거동, 열-화학적 인자

1. 서 론

최근 사업화, 도시화의 급속한 발전으로 인하여 도심은 날로 복잡해지고 교통량이 증가하고 있다. 제한된 국토 면적에 비해 증가하는 교통량으로 효율적

*Corresponding author: Inn-Joon Park
E-mail: geotech@hanseo.ac.kr

Received March 7, 2016; Revised March 16, 2016;
Accepted March 17, 2016

인 공간 이용의 필요성이 급증하므로 여러 가지 토목 구조물의 건설이 이루어지고 있다. 그 중 대표적인 것이 하나의 단면으로 교통수단과 라이프라인을 동시에 연결, 소통시킬 수 있는 복층터널이라 할 수 있다. 특히 도심지에 건설되는 복층터널 건설시 터널 라이닝과 주위 지반이 접촉하게 되고, 그 사이에 차수, 보호 또는 지반보강의 목적으로 토목섬유를 시공하게 된다. 따라서 필연적으로 지반-토목섬유 접촉면(interface)이 형성되어 터널의 전단 거동에 큰 영향을 미치게 되며, 특히 지진과 같은 동적하중 재하시 그 거동은 매우 복잡해지므로 이론적 접근에 한계가 있고 실험적 접근이 필수적이다. 본 연구에서는 터널 주위지반을 사질토로 가정하고 지하수 내 산성 및 중성과 같은 화학적 성분이 반복 전단하중 상태에서 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소에 미치는 영향을 실내 시험을 통하여 분석하였다. 또한 지열, 외기 온도차, 지중압력, 지하수 등 여러 가지 요인에 의하여 형성되는 지중 온도차를 고려하기 위하여 시료의 온도를 20°C와 40°C로 설정하여 온도에 의한 접촉면의 동적 전단특성을 고려하였다. 이를 위하여 접촉면 동적전단시험기를 이용하고 60일, 960일간 수침시킨 토목섬유와 흙 시료를 이용하여 반복 단순전단시험을 수행하였다. 시험 결과를 분석하기 위해 교란상태개념(Disturbed State Concept, DSC)을 이용하였다. 교란상태개념에서 교란도함수(D) 값과 전단소성변형을 상각궤도(Deviatoric Plastic Strain Trajectory, ξ_D) 값을 이용하여 폐기물 매립장의 지반-토목섬유 접촉

면의 파괴형상을 미리 예측할 수 있다(Kwat et al., 2014).

2. 지반-토목섬유 접촉면 교란상태의 개념

2.1 교란상태개념

재료가 외부로부터 하중을 받게 되면 재료내부의 미세구조는 그로 인해 변화를 일으키게 된다. 교란상태개념은 하중을 받는 재료의 거동을 이러한 미세구조의 변화에 근거하여 정량적으로 표현할 수 있다는 가정에 기초하고 있다. 교란상태개념에서는 하중을 받는 재료의 거동을 정의하기 위해 두 개의 기준상태를 도입하였다. 첫 번째는 상대적으로 손상되지 않은 상태(relatively intact, RI) 로써 재료가 외력을 받기 전의 초기 상태에는 미세한 결함들을 포함하더라도 재료가 상대적으로 손상되지 않은 상태로 볼 수 있다. 두 번째는 완전파괴 상태(fully adjusted, FA)로써 재료의 초기상태는 미세하게 존재했던 손상된 부분이 외력에 의해 점차로 확산되어 재료가 전단저항력을 완전히 잃은 상태를 말한다. 하중을 받는 재료는 파괴에 이르기까지 지속적으로 RI 상태에서 FA 상태로 변화하며, 재료의 임의의 상태는 RI 상태와 FA 상태의 사이에 존재하게 된다. RI 상태는 탄성모델 또는 탄소성 모델 등의 구성방정식으로 나타낼 수 있으며, FA 상태는 한계상태개념을 통해 나타낼 수 있다. Fig. 1

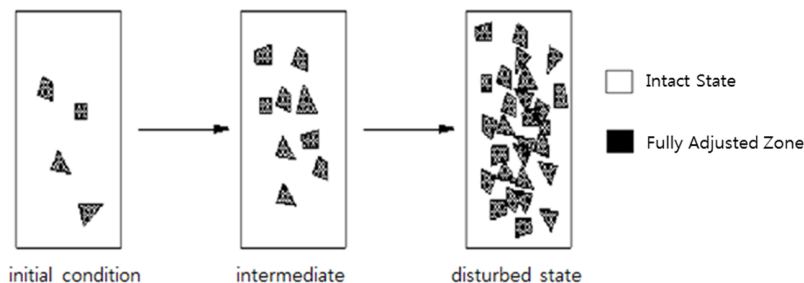


Fig. 1. Relative intact (RI) and fully adjusted (FA) state (Park et al., 2000)

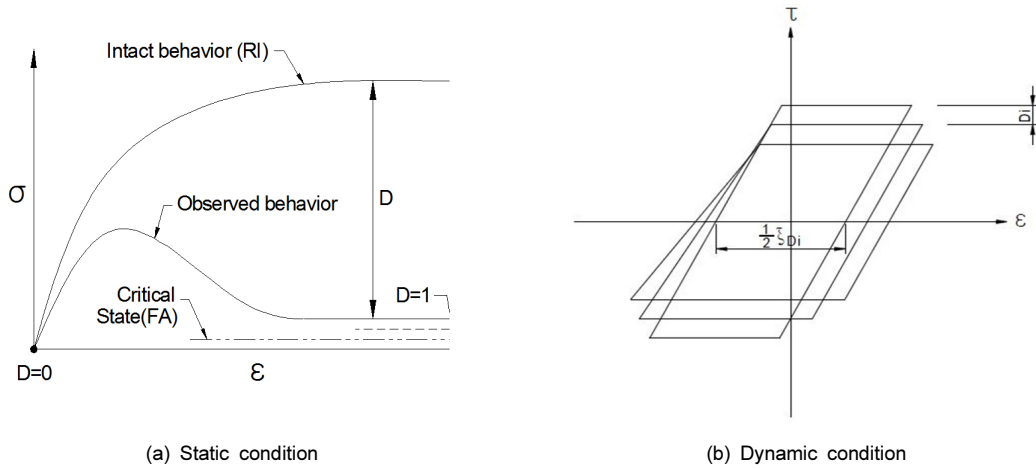


Fig. 2. Schematic of stress-strain behavior (Park et al., 2000)

은 재료가 하중을 받는 초기에는 RI 상태의 거동과 유사한 거동을 보이나 지속적인 하중으로 인해 재료의 미세구조가 자기조정(self-adjustment)과정을 거치면서 점차 한계상태인 FA 상태에 도달하게 되는 과정을 표현하였다. Fig. 2는 재료의 응력-변형률 관계곡선을 정적하중과 동적하중 상태로 나누어 표현하였다. 재료의 교란정도를 나타내는 교란도, D는 두 개의 기준 상태에 대한 응력 수준의 차이를 통해 정의한다 (Park et al., 2000).

2.2 교란도 함수

어떤 재료에서 임의의 응력상태를 RI상태 및 FA상태와 비교하여 교란도(D) 값으로 표현할 수 있으며 이는 다음 식 (1)과 같다. 초기상태에 재료는 전혀 교란된 부분이 존재하지 않는 RI상태라고 가정하면 D값은 0이다. 재료가 완전히 교란된 상태를 FA상태라고 보면, D값은 1이 되는데 실제로 대부분의 재료는 D가 1에 도달하기 전에 파괴에 이르므로 실제의 경우 FA상태의 D는 1보다 작은 값을 가진다.

$$D = \frac{\tau^i - \tau^a}{\tau^i - \tau^c} \quad (1)$$

여기서, τ^i , τ^a 그리고 τ^c 는 각각 RI상태, FA상태 그리고 시험을 통해 얻은 재료의 평균의 평균 전단응력 값을 나타낸다. 교란도와 응력-변형률 상관도로부터 산정한 소성변형의 누적량을 표현하는 매개변수를 전단소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strain trajectory, ξ_D)라고 하고, 이에 관한 상관식은 식 (2)와 같이 표현하였다.

$$D = D_u (1 - e^{-A \xi_D^Z}) \quad (2)$$

여기서 D_u 는 한계 교란도이고, A, Z는 재료특성에 의해 결정되는 변수이다. 상수 D_u 는 여러 연구에서 1로 가정되었다(Armaleh and Desai, 1990). 이러한 가정은 물체가 한계상태에 도달했음을 의미하는 잔류 응력이 임계상태에 접근하는 것과 같은 이상적인 상태에 기초한 것이다. 하지만 실제 실험결과는 잔류응력이 임계응력보다 1% ~ 2% 정도 크게 측정됨을 보여준다. 그러므로 D_u 값을 0.99로 하는 것이 합당하다. ξ_D 의 산정 방법은 식 3과 같다. 여기서 u_r^P 는 소성상대수평변위이며 ν_r^P 는 소성상대수직변위이다.

$$\xi_D = \int (du_r^P \cdot du_r^P + d\nu_r^P \cdot d\nu_r^P)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

3. 지반-토목섬유 접촉면 동적 전단시험

3.1 실내 시험 방법

본 연구에서는 지반-토목섬유 접촉면 동적 전단과
괴의 거동 특성을 분석하기 위해 다기능 접촉면 전단
시험기(Multi-purpose interface Apparatus, M-PIA)를
이용하였다. 본 기기는 국내 최초로 지반과 임의 재료

의 접촉면의 정, 동적 강도저하 평가 및 온도 조건
제어가 가능한 시험기이다. 본 기기에서는 연직하중
(nomal force) 재하기구와 전단하중(shear force) 재하
기구를 분리함으로써 상부 모듈(⑬)에서 연직하중만
을 재하하고, 하부 모듈(⑮)에서 전단하중만을 재하하
여 모멘트 발생을 억제하며 시험결과 신뢰성을 향
상시켰다. 12개의 전단링(12개의 전단링(①~⑫)으
로 시료전체의 변위를 측정함으로써 근접한 접촉면의
두께를 산정할 수 있다. 시료의 상대밀도는 60%로

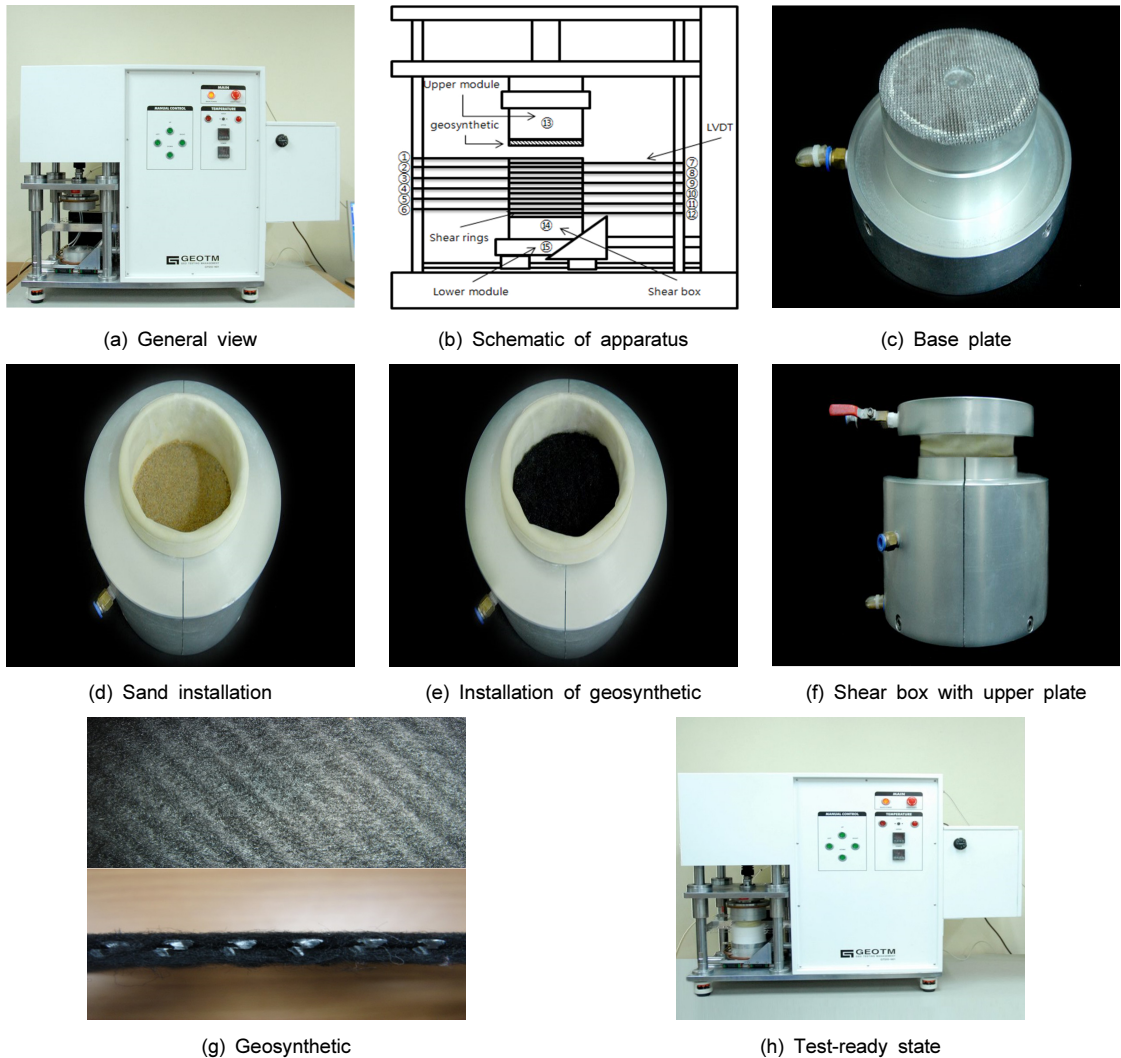


Fig. 3. Multi-purpose interface Apparatus

Table 1. Specification

unit	specification
vertical section	maximum load : 10 kN maximum stroke distance : 150 mm or more
horizontal section	maximum load : 10 kN maximum stroke distance : 150 mm or more
servo motor	screw settle-type servo motor system rated speed/ maximum speed : 3000/5000(r/min) encoder : 15 lines, 2500 pulses/revolution
load cell	rated capacity : 10 kN nonlinearity : 0.03%, R.O temperature range : -20°C~ 80°C dynamic fatigue type
software	calibration program (interface) specimen size and test conditions input type test data display save and analysis unit conversion and graphic zoom function

설정하고 시료의 성형은 층별 다짐을 고려한 침강법 (Ladd, 1978)을 이용하여 각 시료의 함수비를 측정 한 후 시료의 무게를 계산하고 1, 2차 다짐을 330 mm 높이에 맞추어 시험을 수행하였다. Fig 3은 동적 접촉면 전단시험기의 외형과 모식도 및 구성요소를 나타 내었고, Table 1은 동적 접촉면 전단시험기 사양을 나타내었다.

흙 시료는 국내 대표적인 사질토인 주문진 표준사를 사용하였으며 토목섬유는 국내에서 가장 널리 사용되는 Composite Type(HDPE Geonet + Non-woven fabric)을 사용하였다. 시험 조건은 다음 Table 2와 같다. 수침기간에 따른 전단거동의 비교를 위하여 60 일 및 960일 동안 시료를 수침하였고, pH조건은 약산성, 중성으로 구현하였으며 온도는 40°C, 20°C의 온도별로 시험을 실시하였다.

Table 2. Test conditions

soil	geosynthetic	chemical factor	pH	vertical load (MPa)	submerging periods (days)
Standard sand	Geocomposite	CH3COOH	4.0	0.3	60 and 960
		H2O	7.0		

3.2 동적 전단응력-변형을 관계

지반-토목섬유 접촉면의 동적 전단파괴 특성을 분석하기 위해서 수침기간 및 2가지 화학조건, 2가지 온도를 형성하여 총 8가지 경우에 대하여 동적 전단시험을 실시하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 0.5 Hz 의 동적 하중을 최대 100회에 걸쳐 재하한 결과이며 대표적으로 1회, 5회, 10회, 30회, 50회 재하시 전단응력-전단변형을 관계곡선을 도시하였다. Fig. 4에서와 같이 모든 화학조건에서 재하횟수가 증가할수록 최대전단응력이 감소하는 현상이 나타났다. 수침기간 960일 시료의 경우 산성과 중성에서 5 cycle 이후에 급격한 파괴형상을 보이는데, 5 cycle에서 최대 전단응력의 감소비율을 비교한 결과 중성에 비해 산성이 약 34.8 % 감소하여 상대적으로 급격한 전단응력의 감소 경향을 나타내었다. 수침기간 960일의 경우 10 cycle 이후 파괴되는 형상인 반면 수침기간 60일의 경우 30 cycle 이후 파괴되는 형상이 나타났다. 이는 수침기간이 오래될수록 전단파괴가 빨리 일어남을 시사하며, 지반-토목섬유 접촉면의 전단거동이 침출수의 화학적 성분과 접촉면의 수침기간에 의하여 영향을 받는 것으로 판단된다. 그리고 온도의 변화에 따라서도 40°C에서 20°C에서보다 빠르게 파괴되는 모습을 확인할 수 있다.

3.3 지반-토목섬유접촉면 거동 특성

시험결과(Fig. 4 참조) 동하중 재하횟수가 증가할수록 지반-토목섬유 접촉면 전단응력이 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 교란도(식 1 참조) 증가로 인한 손상(damage)의 축적을 의미한다. 시험을

통하여 최종적으로 찾고자 하는 교란도 함수값은 전단응력-변형률 곡선으로부터 산정한 전단응력값과 소성변형의 누적량을 이용하여 구할 수 있다. 시험결과를 통해 얻어진 교란도 함수곡선 산정결과를 도시하면 Fig. 5와 같다. 이는 pH 와 수침기간, 온도에 따라서 지반-토목섬유 접촉면의 손상 정도가 달라짐을 의미하므로 각각 다른 교란도 함수(D)를 구할 수 있다.

Fig. 5에서, 수침기간 및 온도에 관계없이 산성 조건에서 중성에 비해 급격히 파괴되는 형상이 나타났다. 또한 접촉면의 손상 정도를 교란도 함수 곡선으로 표현함으로써 전단소성변형률 상각계도(ξ_D)에 따라 교란도 값의 차이를 정량적으로 파악할 수 있다. 종합적으로, 수침기간 960일의 경우 하중재하 초기에 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소가 발생하고, 산성

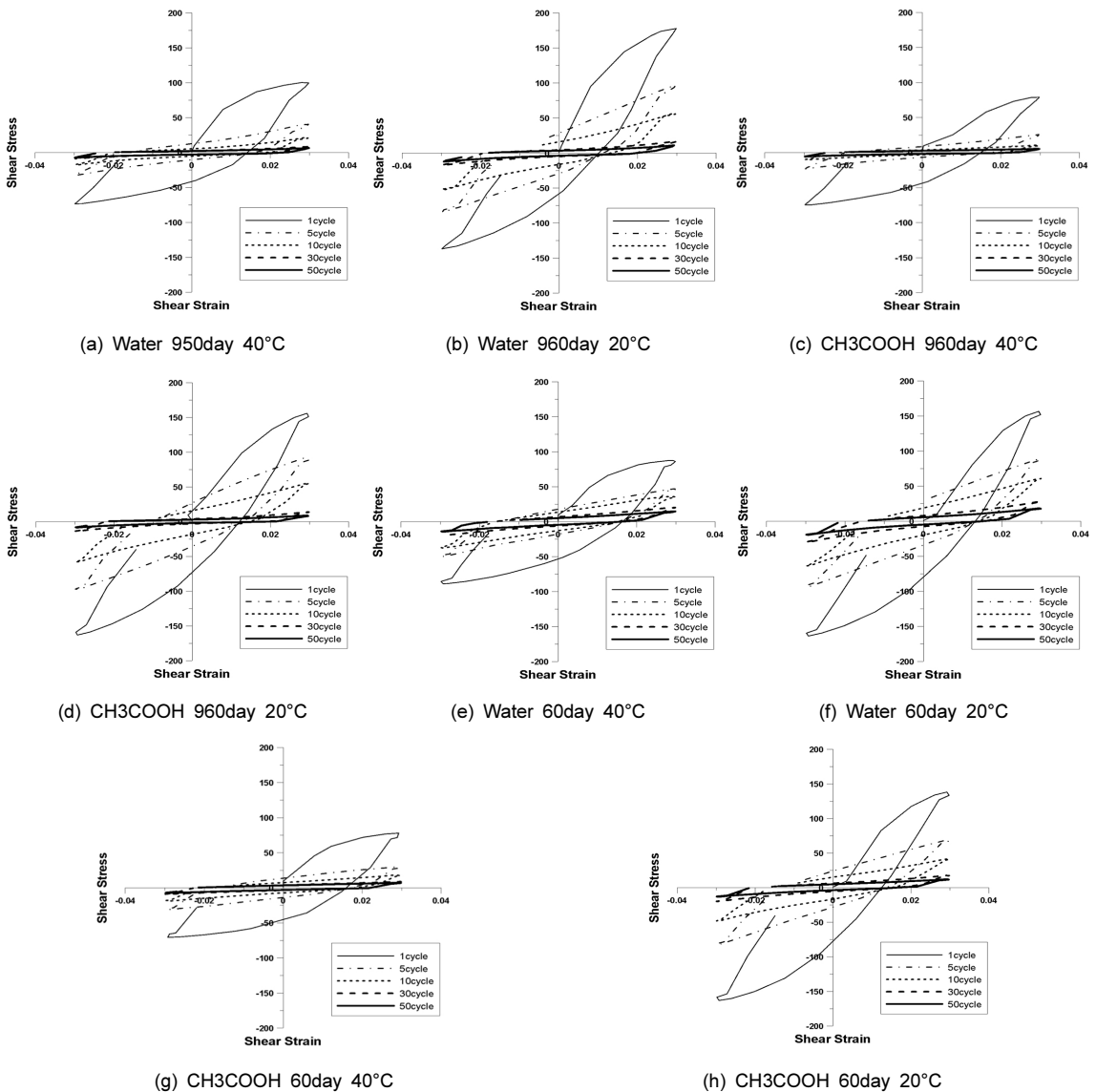


Fig. 4. Cyclic Shear stress-strain relationship

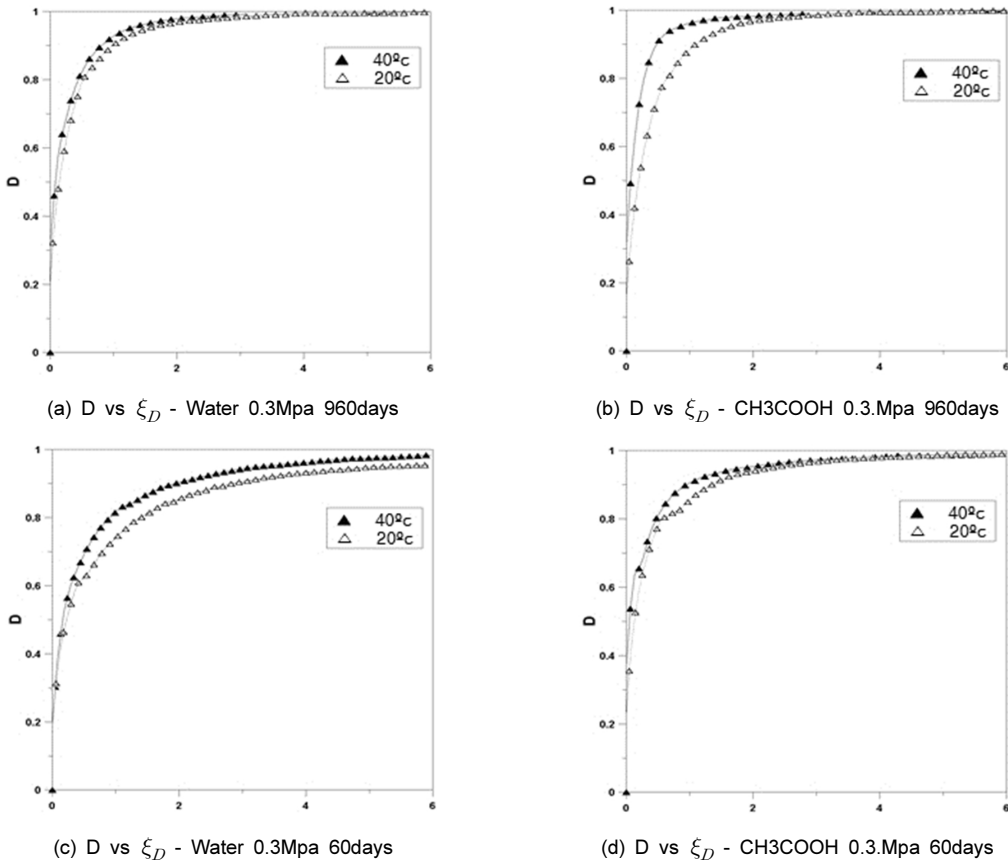


Fig. 5. Disturbance function(D)-deviatoric plastic strain trajectory(ξ_D) relationship

조건에서 수침기간이 오래되고 온도가 높을수록 지반-토목섬유 접촉면에서 초기 전단파괴가 급격히 일어남을 알 수 있다.

따라서, 실질적으로 화학적 조건에 노출된 지반-토목섬유 접촉면의 전단거동 특성을 교란도 함수로서 정량적으로 파악하였고 각각의 온도 조건별로 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소 특성이 뚜렷이 구분됨을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 도심지 복층터널 주위 지반-토목섬유 접촉면의 동적 전단거동 검토를 위해 화학적 영향인자(pH조건)와 온도 조건을 고려하여 다기능

접촉면 전단시험기(M-PIA)를 이용하여 지반-토목섬유 접촉면의 동적 전단강도 특성 시험을 수행하였으며, 실내시험 결과를 토대로 지반-토목섬유의 접촉면에 교란상태개념을 접목시켜 접촉면 동적거동을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1 접촉면에 수침기간(960일, 60일), 화학적 영향인자(산성, 중성)를 통하여 온도 40°C, 20°C에서의 전단 파괴 형상에 대해 분석하였다. 온도가 올라갈수록 전단응력이 증가하고, 수침기간 960일 시료의 경우 중성에서 가장 큰 전단응력이 측정되었고 산성에서 1~3 cycle 이후의 급격한 전단파괴를 보이고 가장 낮은 전단응력이 측정되었다. 수침기간 60일 시료의 경우 중성, 산성 순서로 전단응력이 측정되었다.

초기단계의 전단응력은 온도별로 비슷한 결과를 나타내었지만 반복 진동재하 횟수가 늘어남에 따라 화학인자별 전단응력의 감소폭이 증성에서 가장 적게 측정되었다. 수침기간 60일 시료에 비해 수침기간 960일 시료에서는 반복 진동재하 횟수가 늘어남에 따라 화학인자별 전단응력의 감소폭이 상대적으로 크게 나타났다. 전단응력의 감소폭이 크다는 것은 접촉면에 하중이 작용할 때 급격히 파괴되어 붕괴 위험이 있는 것으로 판단된다. 결과적으로 수침기간이 오래될수록 전단파괴가 빠르게 일어남을 알 수 있다.

2. 각각의 수침기간 및 화학적 영향인자별 교란도함수 값을 비교한 결과, 산성조건에서 초반에 교란도가 급격히 증가하여 재하 초기에 파괴되는 형상을 나타내었다. 수침기간별로 분석한 결과 완만한 파괴 형상을 보이는 60일 수침시킨 시료에 비해 960일 수침시킨 시료에서는 재하 초기에 파괴되는 형상을 나타내었다. 이를 종합하면 전체 조건에서 증성에 비해 산성에서 상대적으로 빠르게 전단파괴가 발생하였다. 이는 화학적 영향인자가 접촉면에 반응할 경우 접촉면에서 초기에 급격히 일어남을 알 수 있다. 특히, 모든 조건에서 산성의 경우 빠른 전단파괴가 일어났다. 또한, 시료의 수침기간이 오래될수록 전단파괴가 급속히 일어남을 알 수 있다.
3. 20°C와 40°C의 접촉면 전단파괴의 특성은 산성에서만 온도조건과 연계효과를 보이며 전단응력 값이 감소되는 것을 알 수 있었다. 산성의 경우 40°C의 조건일 때 20°C의 조건에서 보다 빨리 파괴되는 모습을 전단응력-변형을 곡선을 통해 확인할 수 있었다. 이는 온도에 의해 지반-토목섬유 접촉면 동적 전단강도의 저하가 가속화된 것으로 분석할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)

2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Armaleh, S.H., Desai, C.S. (1990), Modeling Include Testing of Cohesionless Soils under Disturbed State Concept, Report to the NSF, Dept. of Civil Engrg. and Engrg. Mech., Univ. of Arizona, Tuscon, Arizona.
2. Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H.J., Heron, G., Noelsen, P.H., Bjerg, P.L., Holm, P.E. (1994), Attenuation of Landfill Leachate Pollutants in Aquifers, Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., Vol. 24, pp. 119-202.
3. Kwak, C.W., Park, I.J., Park, J.B. (2013)a, “Modified cyclic shear test for evaluating disturbed function and numerical formulation of geosynthetic-soil interface considering chemical effect”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 36, No. 4, pp. 553-567.
4. Kwak, C.W., Park, I.J., Park, J.B. (2013)b, “Evaluation of disturbance function for geosynthetic-soil interface considering chemical reactions based on cyclic direct shear tests”, Soils and Foundations, Vol. 53, No. 5, pp. 720-734.
5. Ladd, R.S. (1978), “Preparing test specimens using undercompaction”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23.
6. Park, I.J., Desai, C.S. (2000), “Cyclic behavior and liquefaction of sand using disturbed state concept”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 9, pp. 834-846.
7. Park, I.J. Yoo, J.H., Kim, S.I. (2000), “Disturbed state modeling for dynamic analysis of soil-structure interface”, Journal of KGS, Vol. 16, No. 3, pp. 5-13.
8. Seo, M.W., Park, J.B., Park, I.J. (2007), “Evaluation of interface shear strength between geosynthetic under wet condition”, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 5, pp. 845-856.