

폐기물 매립장 지반-토목섬유 접촉면의 동적 전단거동 특성

Dynamic Shear Behavior of the Ground-geosynthetics Interface in the Waste Landfill

장 동 인¹ Jang, Dong-In

김 영 준² Kim, Young-Jun

곽 창 원³ Kwak, Chang-Won

박 인 준⁴ Park, Inn-Joon

Abstract

The construction of waste landfill sites has been increased due to recent expansion of various waste. Geotextiles are widely used for the purpose of reinforcement and protection of waste inside the landfill. Geotextile affects the shear behavior of waste landfill which forms the contact surface with soil. In this study, the effect of acidic and alkaline components in leachate has been analyzed through the laboratory experiment on the shear stress reduction of the contact surface of ground-geotextile under the cyclic load. For this purpose, a dynamic contact surface shear tester has been manufactured, and cyclic simple shear tests have been performed using geotextile and soil specimen which were immersed in chemical solutions for 60 and 840 days, respectively. Based on the Disturbed State Concept, the characteristics of shear stress on the contact surface of ground-geotextile due to chemical factors have been identified by the disturbance function.

요 지

최근 늘어나고 있는 폐기물량에 따라 폐기물 매립장의 건설이 증가하고 있으며, 매립장 내 폐기물의 보강 및 보호 목적으로 토목섬유가 널리 사용되고 있다. 토목섬유는 흙과의 접촉면을 형성하는데 폐기물 매립장의 전단 거동에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 침출수 내의 산성 및 염기성과 같은 성분이 반복 전단하중 상태에서 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소에 미치는 영향을 실내 시험을 통하여 분석하였다. 이를 위하여 동적 접촉면 전단시험기를 제작하고 60일, 840일간 수침시킨 토목섬유와 흙 시료를 이용하여 반복 단순전단시험을 수행하였고, 그 결과를 교란상태개념에 기초하여 화학적 인자들에 의한 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소 특성을 교란도 함수로써 확인하였다.

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

1 비회원, 한서대학교 토목공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Hanseo Univ.)

2 비회원, 한서대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanseo Univ.)

3 정회원, 한국지역난방기술 토목팀 (Member, Ph.D, Civil Engineering Team, Korea District Heating Engineering Co. Ltd.)

4 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engineering, Hanseo Univ., Tel: +82-41-660-1054, geotech@hanseo.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 도시화, 산업화의 급속한 진전으로 인한 후속 현상으로서 빠른 속도로 증가하고 있는 폐기물의 매립을 위하여 폐기물 매립장의 설계 및 시공이 현저하게 증가하고 있는 추세이다. 폐기물 매립장은 낮은 접촉면 전단강도에 의해 지반-토목섬유 사이에 미끄러짐이 발생하여 과대변위를 일으켜 파괴가 일어날 수 있다. 폐기물 매립장 차수시설의 지반-토목섬유 접촉면 전단강도 특성이 중요한 과제로 부각되었고, 국내외에서는 주로 대형 직접전단 시험에 의해 정적 전단강도 연구가 진행되고 있다(Christensen et al., 1994). 매립장에서 발생하는 침출수에는 환경에 유해한 물질들이 다량으로 포함되어, 매립장 설계 시 침출수가 외부로 누출되지 않도록 주의해야 한다. 이러한 목적으로 매립장의 바닥과 사면에는 토목섬유로 이루어진 차수시설이 설치된다. 매립장 차수시설에 사용된 토목섬유로 인하여 토목섬유와 흙 사이에는 폭넓은 접촉면(interface)을 형성하며 접촉면의 전단 거동특성이 폐기물 매립장의 안전성에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 지반-토목섬유 접촉면 전단강도를 정확하게 평가하는 것이 매립장의 안정성 확보에 중요한 요소이므로 지반-토목섬유 접촉면의 정적 또는 동적 전단거동에 대한 다수의 연구가 진행되어 왔다(Seo et al., 2007; Kwak et al., 2013a,b). 그러나 기존 연구는 외부 환경조건의 고려 없이 지반-토목섬유 접촉면의 역학적인 전단거동만을 중점적으로 연구하였다는 한계가 있어 실질적으로 화학적 조건에 노출된 지반-토목섬유 접촉면의 전단거동 특성에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 산성 또는 염기성을 띠는 침출수에 지속적으로 노출되어 있는 토목섬유와 흙의 상태를 고려하여 지진하중이 작용할 때의 전단거동특성을 파악하도록 한다. 60일, 840일간 산성, 중성, 염기성 용액에 수침시킨 토목섬유와 모래 시료에 대하여 0.5Hz의 동적 전단하중을 재하하여 화학적 영향인자에 따른 전단응력과 전단변형을 및 지반-토목섬유 접촉면의 상대변위를 산정하여 분석하였다. 지반-토목섬유 접촉면의 손상 정도는 교란상태개념(disturbed state concept)에 기초한 교란도 함수(disturbance function)를 이용하여 표현하였다. 동적 접촉면 전단시험기에 의해 결정된 각 수침기간 별 지반-토목섬유의 접촉면에 대한 전단응력-전단변형을 관계곡선을 산정하고, 재하횟수별 전단소성변형을

상각계도(ξ_D) 및 교란도 함수(D)값을 구하였다.

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 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. 1은 재료가 하중을 받는 초기에는 RI 상태의 거동과 유사한 거동을 보이거나 지속적인 하중으로 인해 재료의 미세구조가 자기조정(self-adjustment)과정을 거치면서 점차 한계상태인 FA 상태에 도달하게 되는 과정을 표현하였다. Fig. 2는 재료의 응력-변형을 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).

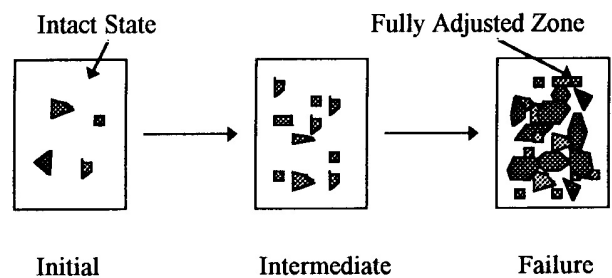


Fig. 1. Relatively intact (RI) and fully adjusted (FA) state (Park et al., 2000)

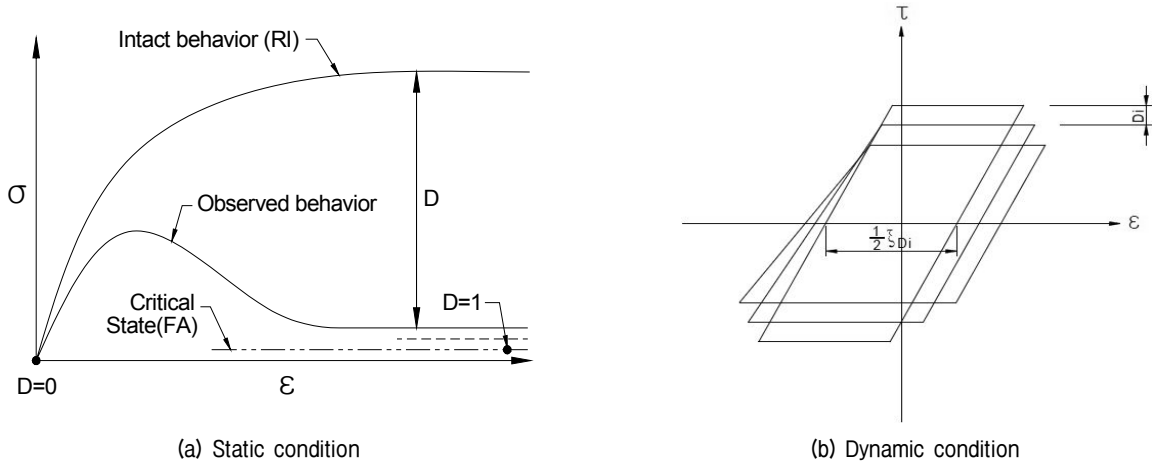


Fig. 2. Schematic of stress-strain behavior(Park et al., 2000)

2.2 교란도 함수

어떤 재료에서 반복 전단하중 재하시 임의의 응력상태를 RI 상태 및 FA 상태와 비교하여 교란도(D) 값으로 표현할 수 있으며 이는 다음 식 (1)과 같다. 초기상태의 재료는 전혀 교란된 부분이 존재하지 않는 RI 상태라고 가정하면 D 값은 0이다. 재료가 완전히 교란된 상태를 FA 상태라고 보면, D 값은 1이 되는데 실제로 대부분의 재료는 D 값이 1에 도달하기 전에 파괴에 이르므로 실제의 경우 FA 상태의 D 값은 1 보다 작은 값을 가진다.

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

여기서 τ^i , τ^c 그리고 τ^a 는 각각 RI 상태, FA 상태 그리고 임의 반복하중 재하상태의 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 표현할 수 있다.

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

여기서 D_u 는 한계 교란이고, A, Z는 물질 변수이다. A, Z 값은 식 (2) 양변에 두 번 연속하여 자연로그를 취하여 구할 수 있으며(Kwak et al., 2013b) 상수 D_u 는 여러 연구에서 0.99로 가정되었다(Armaleh and Desai, 1990). 이러한 가정은 물체가 한계상태에 도달했음을 의미하는 잔류응력이 임계상태에 접근하는 것과 같은 이상적

인 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 (3)과 같다. 여기서 u_r^P 는 소성상대수 평변위이며 v_r^P 는 소성상대수직변위이다.

$$\xi_D = \int \left(du_r^P \cdot du_r^P + dv_r^P \cdot dv_r^P \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

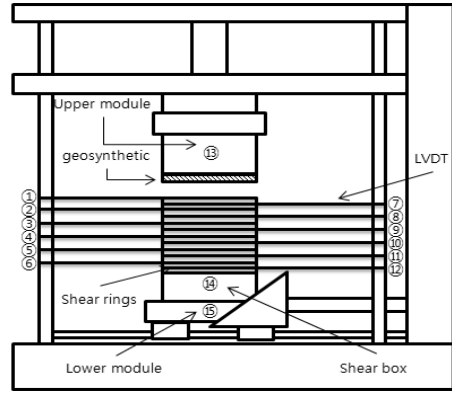
3. 지반-토목섬유 접촉면 동적 전단시험

3.1 실내 시험 방법

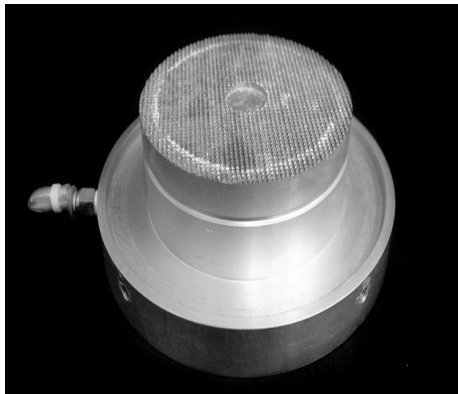
본 연구에서는 지반-토목섬유 접촉면 동적 전단파괴의 거동 특성을 분석하기 위해 다기능 접촉면 전단시험기(Multi-purpose Interface Apparatus)를 제작하였다. 본 기기는 국내 최초로 지반과 임의 재료의 접촉면의 정, 동적 강도저하 평가 및 온도조건 제어가 가능한 시험기이다. 본 기기에서는 연직하중(normal force) 재하기구와 전단하중(shear force) 재하기구를 분리함으로써 상부 모듈(⑬)에서 연직하중만을 재하하고, 하부 모듈(⑮)에서 전단하중만을 재하하여 모멘트 발생을 억제하여 시험결과의 신뢰성을 향상시켰다. 12개의 전단링(①~⑫)으로 시료전체의 변위를 측정함으로써 근접한 접촉면의 두께를 산정할 수 있다. 시료의 상대밀도는 60%로 설정하고 시료의 성형은 각 시료의 함수비를 측정 후 시료의 무게를 계산하고 1, 2차 층다짐을 통하여 시료성형을 완료하였다(Ladd, 1978). Fig. 3은 동적 접촉면 전단시험기를 설치한 모습과 시험기의 모식도이고,



(a) General view



(b) Detail of dynamic interface-shear tester



(c) Base plate



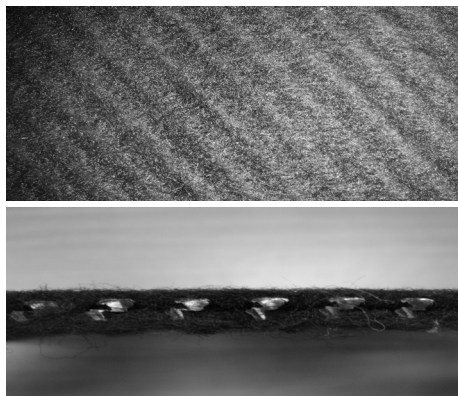
(d) Sand installation



(e) Geosynthetic installation



(f) Shear box with upper plate



(g) Geosynthetic sample



(h) Test-ready state

Fig. 3. Schematic of dynamic interface-shear tester

Table 1은 동적 접촉면 전단시험기 사양이다.

본 시험에서는 국내 대표적인 사질토인 주문진 표준사를 사용하였으며 토목섬유는 국내 폐기물 매립장에서 가장 널리 사용되는 Composite Type을 사용하였다. Table 2의 조건으로 연직하중 0.3MPa을 가하여 시험을 수행하였다. 수침기간에 따른 전단거동의 비교를 위하여 60일, 840일 동안 시료를 수침하였고, pH 조건은 약 산성, 약염기성으로 현장과 가장 유사하게 모사하여 시험을 수행하였다.

3.2 동적 접촉면 전단시험에 따른 전단응력-전단변형을 관계 곡선

지반-토목섬유 접촉면 전단파괴 특성을 분석하기 위해서 수침기간 및 3가지 화학조건을 형성하여 총 6가지 경우에 대하여 동적 전단시험을 실시하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 0.5Hz의 동적 하중을 최대 100회에 걸쳐 재하한 결과이며 대표적으로 1회, 5회, 10회, 30회, 50회 재하 시 전단응력-전단변형을 관계를 도시하였다. Fig. 5는 반복 전단하중 재하횟수별 최대 전단응력을 도시하였다. 모든 화학조건에서 재하횟수가 증가할수록 전단응력이 감소하는 현상이 나타났다. 2가지 수침기간에서 중성에서 가장 큰 전단응력이 측

정되었다. 수침기간 840일 시료의 경우 산성 및 염기성에서 5 cycle 이후에 급격한 파괴형상을 보이는데, 5 cycle에서 최대 전단응력의 감소비율을 비교한 결과 중성에 비해 산성이 약 35.1%, 염기성이 약 67.6% 감소하여 상대적으로 염기성에서 보다 급격한 전단응력의 감소 경향을 나타내었다. 수침기간 840일의 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.

3.3 지반-토목섬유 접촉면 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 그래프 상에서 구할 수 있다. 시험결과를 통해 얻어진 교란도 함수곡선 산정결과를 도시하면 Fig. 6과 같다. 이는 pH와 수침기간에 따라서 지반-토목섬유 접촉면의 손상 정도가 달라짐을 의미하므로 각각 다른 교란도 함수(D)를 구할 수 있다.

Fig. 6에서, 수침기간에 관계없이 산성, 염기성 조건에서 중성에 비해 급격히 파괴되는 현상이 나타났다. 수침기간 840일의 경우 특히 염기성에서 반복재하횟수 5회 이후 파괴되는 현상이 나타났고, 수침기간 60일의 경우 전체적으로 반복재하횟수 30회 이후 파괴되는 경향을 보였다. 또한 접촉면의 손상 정도를 교란도 함수 곡선으로 표현함으로써 전단소성변형률 상각계도(ξ_D)에 따라 교란도 값의 차이를 정량적으로 파악할 수 있다. Fig. 6(b)와 같이 중성일 경우 전단소성변형률 상각계도값(ξ_D)이 0.772일 경우 60일 침수시 교란도 값은 0.776,

Table 1. Dynamic interface-shear tester 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

Table 2. Test conditions

Soil	Geosynthetic	Chemical factor	pH	Vertical load (MPa)	Immersing periods (days)
Jumunjin sand	Composite type	CH ₃ COOH	4.0	0.3	60 and 840
		Water	7.0		
		NaOH	8.5		

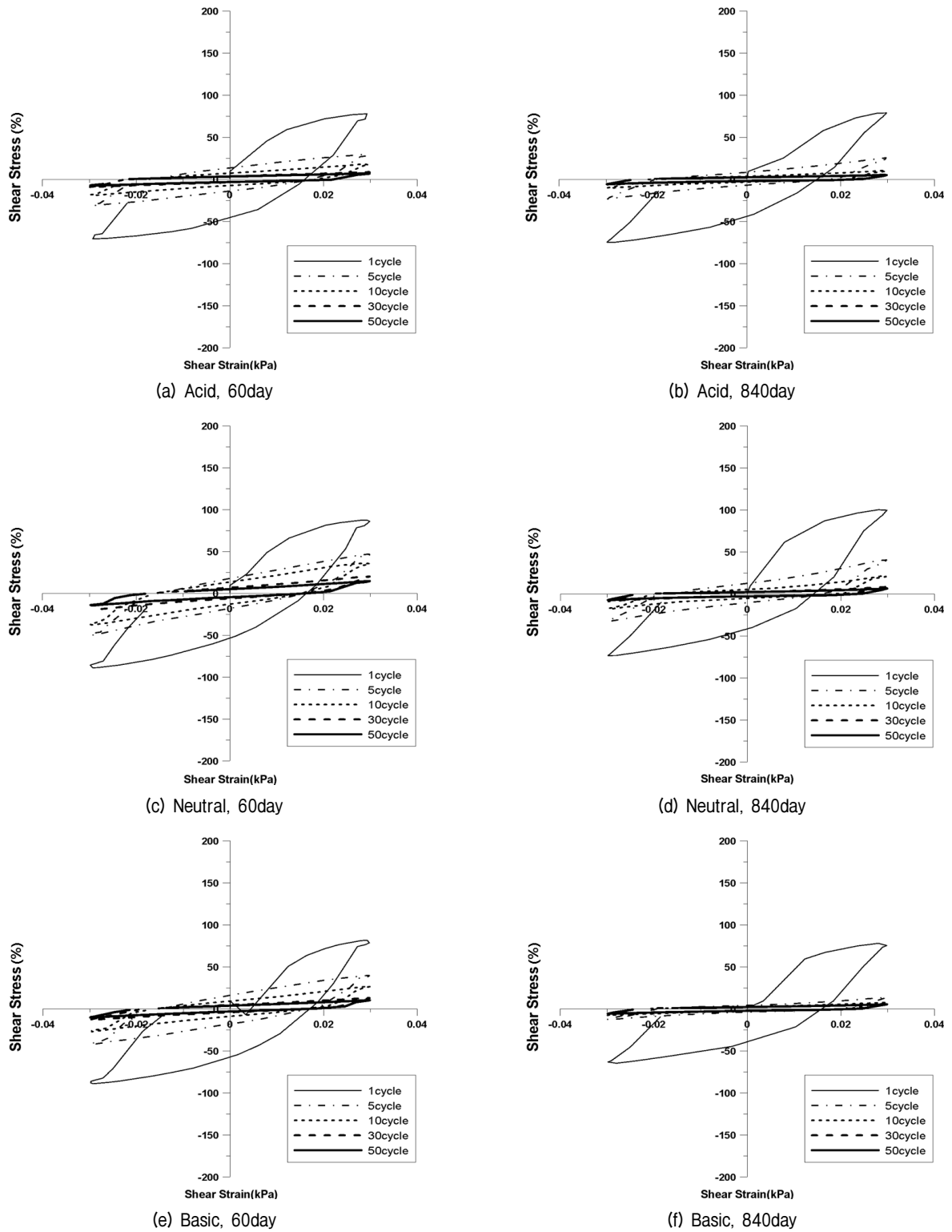
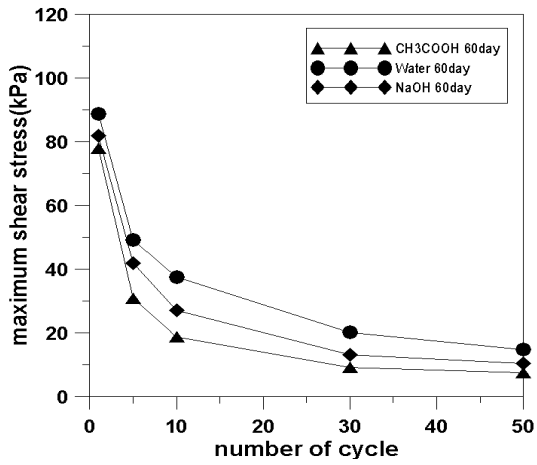


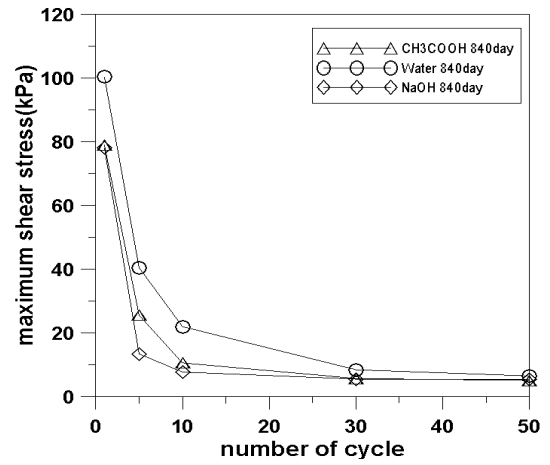
Fig. 4. Shear stress-strain relationship

840일 침수시 0.905로 나타나 침수기간 증가에 따라 교란도 값이 최대 16.6% 증가하였음을 알 수 있다. 종합적으로, 수침기간 840일의 경우 하중재하 초기에 지반-토목섬유 접촉면의 전단강도 감소가 발생하고, 산성 및 염

기성 조건에서 수침기간이 오래될수록 지반-토목섬유 접촉면에서 초기 전단파괴가 급격히 일어남을 알 수 있다. 교란도 함수 곡선식의 물질변수인 A, Z 값의 산정 결과는 다음 Table 3에 나타내었다.

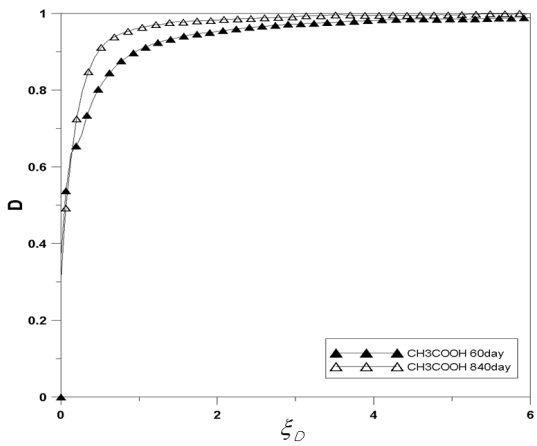


(a) 60 days of immersing periods

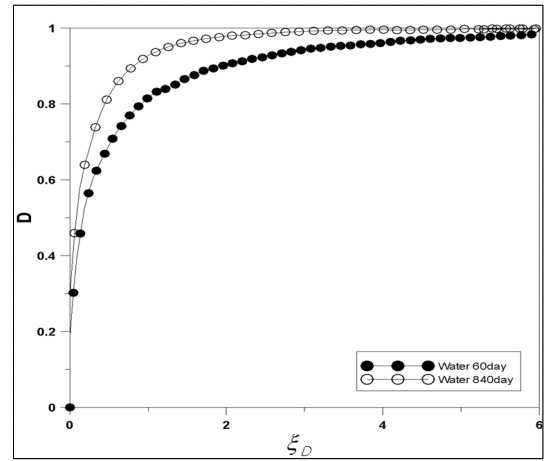


(b) 840 days of immersing periods

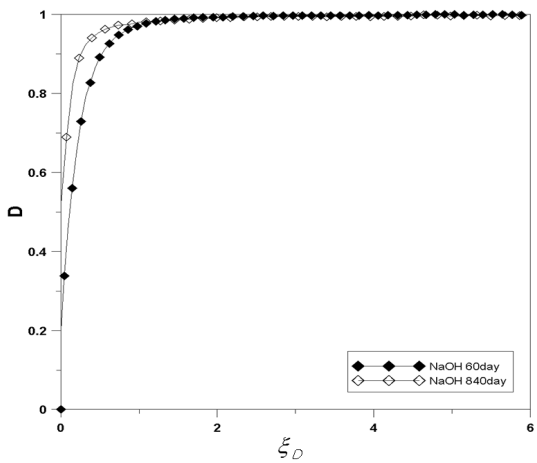
Fig. 5. Maximum shear stress relationship



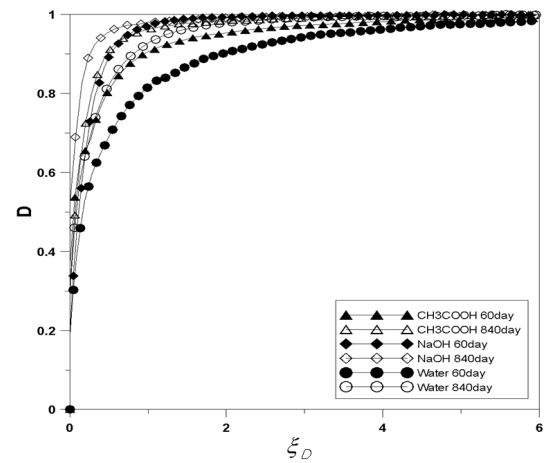
(a) D vs ξ_D - acid



(b) D vs ξ_D - neutral



(c) D vs ξ_D - basic



(d) D vs ξ_D - all cases

Fig. 6. Disturbance function (D) curves

따라서, 실질적으로 화학적 조건에 노출된 지반-토목 섬유 접촉면의 전단거동 특성을 교란도 함수로서 정량적으로 파악하였고 각각의 pH 조건별로 지반-토목 섬유

접촉면의 전단강도 감소 특성이 뚜렷이 구분됨을 확인하였다.

Table 3. A, Z Parameters

Conditions	Submerging Period (days)	A	Z
Acid	60	1.988	0.486
	840	2.132	0.637
Neutral	60	3.371	0.5175
	840	3.582	0.7345
Basic	60	2.063	0.501
	840	2.259	0.391

4. 결론

폐기물 매립장 내 지반-토목섬유의 접촉면의 동적 전단거동 평가를 위해 폐기물 매립장의 화학적 영향인자와 수침기간 조건에 대하여 다기능 접촉면 전단시험기를 이용하여 반복 단순전단시험을 수행하였으며, 실내 시험 결과를 토대로 지반-토목섬유 접촉면에 교란상태개념을 접목시켜 최종적으로 교란도 함수의 매개변수를 구하여 폐기물 매립장의 거동을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 모든 시험조건에서 동적 전단재하횟수에 따른 전단응력 감소 경향을 확인하였다. 이러한 전단응력 감소를 수치적으로 표현하기 위하여 교란상태개념(disturbed state concept)을 도입하여 지반-토목섬유 접촉면에서의 정규화 된 교란도의 경향을 파악하였다. 수침기간 840일의 경우 중성에서 가장 큰 전단응력이 측정되었고, 염기성에서 5 cycle 이후 급격한 전단파괴를 보이고 가장 낮은 전단응력이 측정되었다. 수침기간 60일의 경우 초기단계의 전단응력은 비슷한 결과를 나타내었지만 반복 전단하중 재하횟수가 늘어남에 따라 화학인자별 전단응력의 감소폭이 중성이 가장 적게 측정되었다. 수침기간 60일 시료에 비해 수침기간 840일 시료에서 반복재하횟수가 늘어남에 따라 화학인자별 전단응력의 감소폭이 상대적으로 크게 나타났다. 전단응력의 감소폭이 크다는 것은 지반-토목섬유 접촉면에 하중이 작용할 때 급격히 파괴되어 붕괴 위험이 있는 것으로 판단된다.
- (2) 본 시험에서 얻은 결과 값을 교란도와 응력-변형률 상관도로부터 산정한 소성변형의 누적량을 이용하여 교란도 함수(D)값을 분석한 결과 수침기간 840일의 경우 산성, 염기성 조건에서 반복 전단하중 재하 초기에 파괴되는 형상이 나타났다. 완만한 파괴 형상을 보이는 60일 수침한 시료에 비해 840일 수

침한 시료는 재하 초기에 파괴되는 경향이 나타났다. 이는 화학적 영향인자가 지반-토목섬유 접촉면의 전단응력 감소에 영향을 미치며 수침기간이 오래될수록 접촉면에서 전단파괴가 재하 초기에 급격히 일어남을 알 수 있다.

추후 온도 및 상재압 등의 다양한 인자를 고려하여 폐기물 매립장 설계시 안정성 검토를 위한 다양한 설계정수에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. NRF-2012R1A2A2A01045040). 또한 본 연구는 2013년 한서대학교 교내연구지원사업에 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Armaleh, S.H. and 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., and 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., and Park, J.B. (2013a), "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., and Park, J.B. (2013b), "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. and 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., and 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., and Park, I.J. (2007), "Evaluation of Interface Shear Strength Between Geosynthetic Under Wet Condition", *Soils and Foundations*, Vol.47, No.5, pp.845-856.

Received : July 2nd, 2014
 Revised : March 3rd, 2015
 Accepted : April 1st, 2015