

전단시험 중 모래입자의 변형에 관한 연구 Study on the Evolution of Sand Structure during Shearing

이석원, Seok-Won Lee

한국건설기술연구원 지하구조물그룹 선임연구원, Senior Researcher, Underground Structure Research Group, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : This paper summarizes the results of a study which has quantified the evolution of the structure of sands adjacent to geomembranes of varying roughness at different stages of shearing. The results show that the structure evolution, and hence shear mechanisms for rounded uniform sands adjacent to geomembranes, are directly influenced by the surface roughness of the geomembranes. For smooth geomembranes, the shear mechanism predominantly involves sliding of sand particles and only affects the sand structure within two particle diameters of the geomembrane. For slightly textured geomembranes, the effects of interlocking and dilation of sand particles extends the zone of evolution to four particles diameters from the interface. For moderately/heavily textured geomembranes, the interlocking and dilation of sand particles is fully developed and results in large dilation in the interfacial zone, which extends up to six particle diameters from the interface. By understanding how the structure of the sand adjacent to geomembranes of different roughness changes during shearing, it may be possible to identify alternative geomembrane roughening procedures and patterns that can lead to more efficient interface designs.

Key Words : Surface roughness, Shear mechanism, Geomembrane, Direct shear test, Digital image analysis, Sand structure

1. 서론

지오멤브레인, 지오텍스타일, 지오그리드 등의 토목섬유는 최근 흙 또는 암석과 병행하여 보강토 옹벽 등의 많은 토목공사에 설계·시공되어 지고 있다. 특히, 지오멤브레인의 경우, 표면이 매끄러운 스무드(smooth) 지오멤브레인과 다른 재료들과의 접촉면에서 발생하는 접촉면 전단력(interface strength)을 증가시키기 위하여 표면이 거칠은 돌기형(textured) 지오멤브레인을 사용하고 있으나, 이러한 돌기형 지오멤브레인은 현재 사용 가능한 재료의 실내시험 또는 설계자의 경험에 의존하여 선택되어 지고 있는 실정이다.

현재까지 여러 연구들을 통하여 접촉면에서의 응력-변위 관계는 접촉면을 구성하는 두 재료의 물성치(입자 크기, 입자 분포, 입자 형상, 입자의 표면 거칠기, 평면 재료의 표면 거칠기, 경도 등) 및 접촉면의 구성상태(density, normal stress 등)에 따라 변화된다고 알려졌으며, 특히, 정량적인 표현의 표면 거칠기는 접촉면 전단력을 결정하는데 매우 중요한 요소임이 밝혀졌다(Kishida and Uesugi, 1987; Paikowsky et al., 1995; Dove and Frost, 1996; Dove et al., 1997; Lee et al., 1998).

본 연구에서는 이러한 여러 연구 결과를 증명하고 정량화하기 위하여 3가지 종류의 표면 거칠기를 지닌 각각의 지오멤브레인과 모래와의 전단시험 중 모래입자의 변형(evolution)을 정량적으로 측정하였다.

즉, 지오멤브레인과 모래로 구성된 접촉면에서 전단변형이 진행되는 과정중의 간극비의 변화를 측정함으로써 dilation과 contraction의 변화범위 및 변화정도를 측정하였다. 여기에서 언급된 변형(evolution)은 지오멤브레인과 모래의 상대적인 움직임으로 인하여 발생하는 모래입자의 microstructure의 변화를 의미한다. 결국, 본 연구의 목적은 접촉면에서 지오멤브레인의 표면 거칠기에 따라 모래입자의 변화 양상을 보여줌으로써, 지오멤브레인과 모래로 구성된 접촉면의 전단 메카니즘을 밝히는데 있다.

2. 시험 방법

모래와 지오멤브레인으로 구성된 접촉면에서 여러번의 시험을 통하여 미리 선정된 응력-변위 곡선을 따라 연속적인 직접전단 시험을 수행하면서 각각의 지정된 변위에서 전단시험을 멈추고 epoxy를 사용하여 접촉면에서의 모래구조(sand structure)를 보존하였다. 보존된 시료(specimen)로부터 2개의 시편(coupon)을 자른 후, 모래구조를 digital image analysis 시스템으로 정량화 할 수 있도록 표면을 처리한 후 분석을 실시하였다(Jang, 1997; Jang et al., 1998).

2.1 모래 시료

본 연구에서는 Ottawa 20/30 모래를 사용하였으며, 그 물성치 및 강도특성은 표 1과 같다. Ottawa 20/30는 거의 원형에 가까운 모래로써 대표적인 형상은 그림 1과 같다.

표 1. Ottawa 20/30 모래의 제원

D ₅₀	0.72	e _{max}	0.742 mm
C _u	1.19	e _{min}	0.502 mm
C _c	0.98	φ' _p	38.5
G _s	2.65	φ' _r	27.5

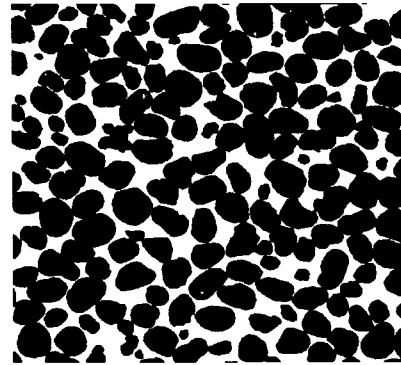


그림 1. Ottawa 20/30의 이미지 예

2.2 지오멤브레인 시료

본 연구에서는 다음과 같이 현재 사용되고 있는 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도의 범위를 포함할 수 있도록, 한 개의 스무드 지오멤브레인과 2개의 돌기형(textured) HDPE 지오멤브레인을 사용하였다.

- National Seal Co. 제품인 Dura Seal HD : 스무드(smooth) 지오멤브레인
- GSE Lining Technology, Inc. 제품인 Friction Flex : 돌기형(textured) 지오멤브레인
- Poly-Flex, Inc. 제품인 Poly-Flex Textured HDPE : 돌기형(textured) 지오멤브레인

본 연구에 사용된 3가지 종류의 지오멤브레인을 Optical Profile Microscopy (OPM) 방법(Dove and Frost, 1996)을 사용하여 측정된 평균 표면 거칠기 정도(R_s)와 그에 따른 표준 편차가 표 2에 나타내어져 있다. 자세한 지오멤브레인의 표면 거칠기 측정방법 및 표면 거칠기 매개변수는 Lee(1999, a, b)에 나타내어져 있다.

표 2. 표면 거칠기 측정 결과

지오멤브레인 종류	평균 표면 거칠기(R_s)	표준편차	거칠기 구분 ¹⁾
NSC Dura Seal	1.09	-	smooth
GSE Friction Flex	1.25	0.03	slightly textured
Poly-Flex Textured	1.71	0.12	moderately/heavily textured

1) Dove 와 Frost(1996)에 의하여 제안된 분류법

2.3 직접전단 시험기

최대 80mm의 수평 변위(horizontal displacement)를 측정할 수 있도록 고안된 직접전단 시험기(그림 2)를 사용하여 모래와 지오멤브레인으로 구성된 접촉면의 전단력 및 모래구조를 측정하였다. 전단시험은 0.01 in/min의 변위 속도로 실시하였다.

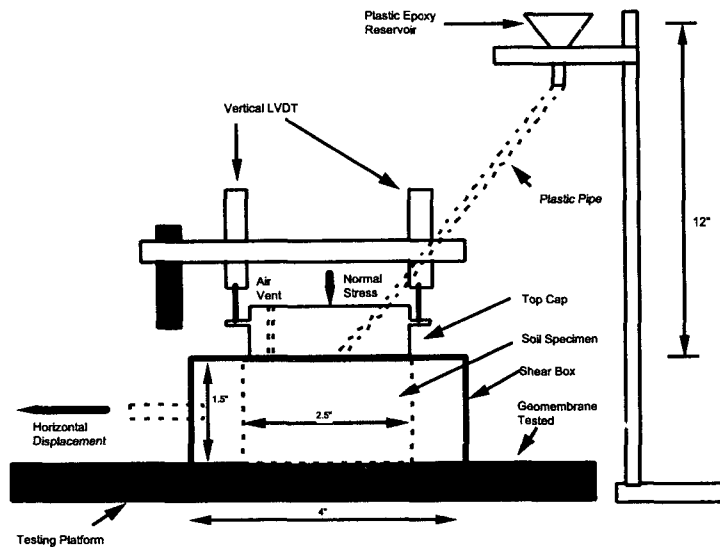


그림 2. 직접전단 시험 장치

전단방향과 기계제작방향이 평행하게 설치된 지오멤브레인 위에 전단박스(102×102 mm)를 설치한 후 air pluviation을 사용하여 모래를 성형(63.5 mm diameter)하고 metal cross arm을 사용하여 연직응력(normal stress)을 가하였다. 한 개의 load cell과 3개의 LVDT에서 측정된 하중, 수평변위, 연직변위의 시험값들은 LabView data acquisition 시스템을 이용하여 컴퓨터에서 자동적으로 측정하였다.

2.4 모래구조의 보존 및 시편 제작

모래와 지오멤브레인의 접촉면에서 전단시험 중 정하여진 응력과 변위 상태에 도달하였을 때 시험을 멈춘후 EPO-TEK 301 Epoxy Resin을 사용하여 모래구조를 응고시킴으로써 보존하였다. 응고를 위한

epoxy 삽입은 모래구조의 변형을 최대한 줄이고자 위치수두 만으로 시험하였다(그림 2). 모래시료 (specimen)가 응고된 후, 전단박스로부터 분리하여 그림 3에 나타난 바와 같이 2개의 시편(coupon)을 성형하였다. 시편 A는 전단방향과 평행하고, 시편 B는 수직한 방향으로 구성하였다.

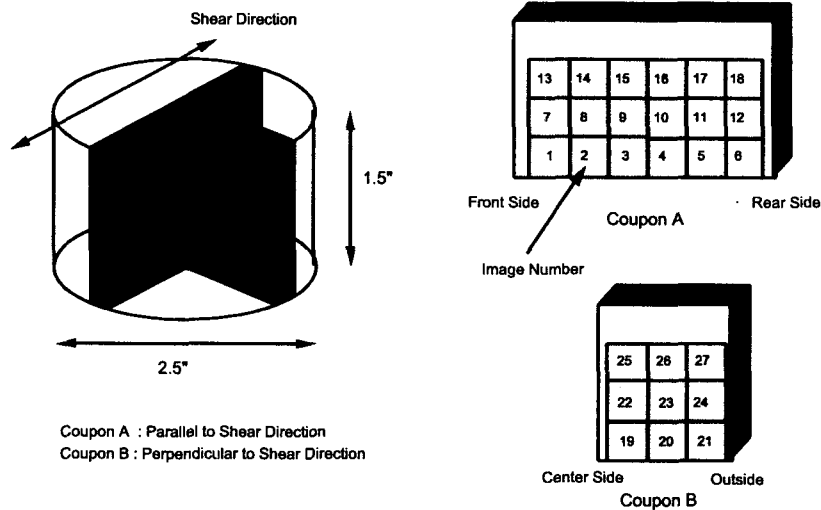


그림 3. 시편과 이미지의 위치

성형된 2개의 시편에서 모래구조의 분석이 이루어질 면은 BUEHLER DIALOG 방법(Jang et al., 1998)을 사용하여 4단계의 표면처리를 실시하였다. 이러한 과정으로 완성된 시편은 CCD 카메라로 이미지(9.2 × 8.6 mm)를 촬영하여 컴퓨터와 연결되어 있는 digital image analysis 시스템을 이용하여 모래구조를 분석하였다.

한 시료 당, 시편 A에서 18개의 이미지와 시편 B에서 9개의 이미지가 촬영되었다. 각각의 이미지는 대략 110개 정도의 모래입자를 포함하고 있다. 총 27개의 이미지는 접촉면으로부터 높이에 따라 크게 3개의 층으로 나누어 분석하였다. 즉, 1층은 시편 A(전단방향과 평행한 시편)의 1번부터 6번까지의 이미지와 시편 B(전단방향과 수직한 시편)의 19번부터 21번 이미지를 포함하며, 이것은 접촉면에서부터 9.2mm 높이까지의 부분을 포함한다. 2층은 7번부터 12번 그리고 22번부터 24번을 포함하고, 3층은 13번부터 18번 그리고 25번부터 27번을 포함한다. 즉, 2층은 접촉면으로부터 9.2mm에 해당하는 높이부터 18.4mm에 해당하는 부분, 그리고 3층은 18.4mm부터 27.6mm에 해당하는 부분을 포함한다.

3. 지오멤브레인의 표면 거칠기가 모래구조의 변형에 미치는 영향

3종류의 다른 표면 거칠기를 지닌 지오멤브레인과 Ottawa 20/30 모래를 사용하여 전단시험을 수행하면서 모래구조(sand structure)의 변형(evolution)을 정량화 함으로써 지오멤브레인의 표면 거칠기가 모래/지오멤브레인 접촉면의 전단 메카니즘에 미치는 영향을 연구하였다. 여러번의 시험을 통하여 미리 선정된 응력-변위 곡선을 따라 전단시험을 실시하다가 정하여진 지점에서 시험을 멈추고 epoxy를 사용하여 모래구조를 보존하고 분석하였다. 모래구조의 변형은 접촉면으로부터 높이에 따라 간극비의 변화를 digital image analysis 시스템을 이용하여 측정함으로써 수행하였다.

3.1 Ottawa 20/30 모래와 스무드 지오멤브레인의 접촉면

Ottawa 20/30 모래와 스무드 지오멤브레인의 접촉면의 전단거동을 연구하기 위하여 연직응력 100 kPa 하에서 미리 규정된 응력-변위 곡선을 따라 6개의 시료를 얻었다. 얻어진 6개의 시료는 표 3에 나타내어져 있듯이 일정 응력과 변위에서 시험을 중지한 후 epoxy를 사용하여 응고시켰다. 그림 4는 digital image analysis 시스템을 이용하여 접촉면으로부터 높이에 따른 간극비의 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서는 6개의 시료를 사용하였으나 간결한 결과를 보여주기 위하여 초기상태, 최대응력 및 잔류 응력에서 구한 3가지의 경우만을 그림 4에 나타내었다.

표 3. 시료 특성의 변화

시료	SMOT22	SMOT31	SMOT41	SMOT51	SMOT61	SMOT71
초기 간극비, e_i	0.550	0.551	0.551	0.550	0.549	0.552
최종 간극비, e_f	0.544	0.546	0.548	0.545	0.543	0.552
전단응력, kPa	0.0	36.5	45.3	37	30.3	26.4
변위, mm	0.0	0.1	0.15	1.14	10.06	76

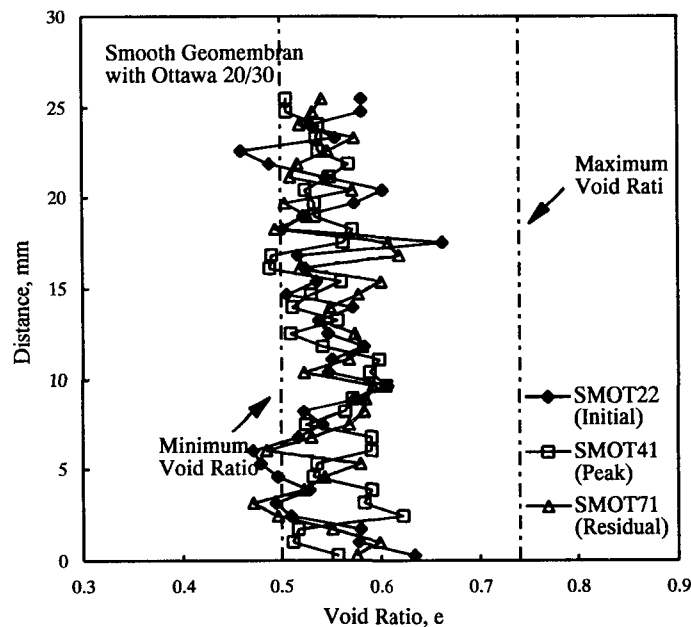


그림 4. 모래입자의 변형

전단시험을 시행하기 전의 상태에서는 air pluviation에 의해 1층의 지역이 2층 및 3층보다 다소 조밀한 분포상태를 보여주었다. 그러나, 입자 2개 정도의 높이까지는 평면과 입자의 접촉면의 구성에서 예측되듯이 약간 느슨한 구조의 분포 상태를 나타내었다. 최대응력이 발생되기 전까지 접촉면 지역에서의 간극비는 변화가 없는 것으로 나타나 입자들간의 상대적인 움직임이 없음을 나타내었다. 그러나, 최대응력이 발생하는 변위에서는 접촉면지역에서 모래입자의 상대적인 움직임이 발견되었다. 즉, 모래입자가 미끄러지면서 접촉면 지역에 비어져 있던 공간을 채우면서 모래구조의 붕괴가 발생하여 접촉면지역에서 평균 간극비보다 약간 적어지는 경향을 보여 주었다. 전단변형이 계속됨으로써, 접촉면에서 시작된 contraction 현상은 상부로 발전하여 1층의 전체부분으로 진행하였다. 그러나, 이러한 현상은 다음에 설명될 돌기형(textured) 지오멤브레인에서 발생하는 것에 비하여 매우 미소한 변화에 불과하였다.

이러한 결과로부터 다음과 같은 전단 메카니즘이 유도되었다. 전단변형은 주로 접촉면으로부터 2개 모래입자 높이에서만 발생하였고, 심각한 dilation 이나 contraction은 발생되지 않았다. 즉, 이것은 최대 응력은 접촉면에서 모래입자가 지오멤브레인 표면에서 미끄러짐으로 인하여 발생함을 보여주고 있다.

최대응력을 지난 후에는 전단응력은 모래입자의 미끄러짐과 plowing 효과에 의해 계속 진행된다. 일단 잔류강도가 얻어진 후에는 모래구조는 더 이상 변화하지 않았다.

3.2 Ottawa 20/30 모래와 Slightly Textured 지오멤브레인의 접촉면

Slightly textured 지오멤브레인과 Ottawa 20/30 모래의 접촉면의 전단변형을 연구하기 위하여 GSE Friction Flex 지오멤브레인을 사용하였다. 100 kPa의 연직응력 하에서 미리 구하여진 응력-변위 곡선을 따라 3개의 시료를 성형하였다(표 4). 그림 5는 초기상태, 최대응력 및 잔류응력 상태에서 접촉면에서부터 높이에 따른 간극비의 변화 양상을 보여주고 있다.

표 4. 시료 특성의 변화

시료	GDOT21	GDOT41	GDOT61
초기 간극비, e_i	0.547	0.547	0.548
최종 간극비, e_f	0.542	0.545	0.567
전단응력, kPa	0.0	77.1	51.2
변위, mm	0.0	1.09	10.1

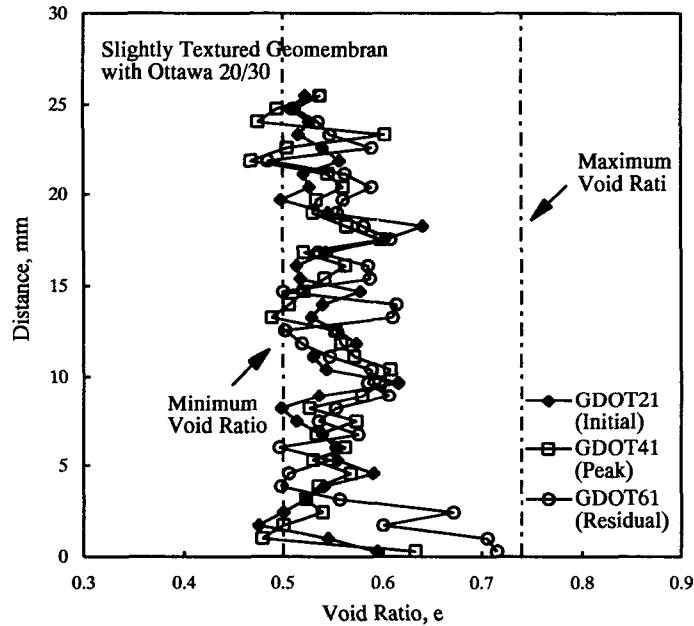


그림 5. 모래입자의 변형

전단변형이 일어나기 전의 초기응력 상태에서는 스무드 지오멤브레인과 같이 1층의 경우 약간의 조밀한 상태, 그러나 접촉면으로부터 2개 입자의 높이까지는 다소 느슨한 상태를 보여주고 있다. 최대응력이 발생하는 변위에서는 접촉면 지역에서 모래입자의 상대적인 움직임이 시작되었다. 접촉면 지역에서 미끄러짐으로 인하여 간극비의 감소를 보여주었던 스무드 지오멤브레인과는 달리 간극비가 증가하는 경향을 보여주었다. 이것은 최대응력 지점에서 지오멤브레인 표면에서 모래입자의 미끄러짐이 발생함과 동시에 모래입자와 지오멤브레인의 거칠은 표면사이에서 interlocking이 발생하여 간극비를 증가시킴을 보여주고 있다. 이러한 변화양상은 대략 접촉면으로부터 2개의 모래입자 높이까지 발생함을 나타내었다. 최대응력을 지나 전단변형이 계속 진행됨에 따라 interlocking의 발생지역은 4개 정도의 모래입자 높이만큼까지 진행되었으며, 이에 따라 이 지역에서의 간극비는 계속 증가하는 경향을 보여주었다.

결국 최대응력 후에 접촉면지역에서의 간극비가 증가하는 결과를 바탕으로 모래입자가 지오멤브레인 표면에서 미끄러짐과 동시에 모래입자와 지오멤브레인의 접촉면에서의 interlocking이 주요 전단 메카니즘임을 알 수 있었다. 또한, 잔류강도가 시작되는 부분부터는 interlocking과 dilation이 더욱 진행되어 대략 접촉면으로부터 4개의 모래입자 높이까지 영향을 미침을 알 수 있었다.

3.3 Ottawa 20/30 모래와 Moderately/Heavily Textured 지오멤브레인의 접촉면

Moderately/Heavily textured 지오멤브레인과 Ottawa 20/30 모래의 접촉면의 전단변형을 연구하기 위하여 Poly-Flex textured 지오멤브레인을 사용하였다. 100 kPa의 연직응력 하에서 미리 구하여진 응력-변위 곡선을 따라 6개의 시료를 성형하였다(표 5). 그림 6은 초기상태, 최대응력 및 잔류응력 상태에서 접촉면에서부터 높이에 따른 간극비의 변화 양상을 보여주고 있다. 본 연구에서는 6개의 시료를 사용하였으나 간결한 결과를 보여주기 위하여 초기상태, 최대응력 및 잔류응력에서 구한 4가지의 경우만을 그림 6에 나타내었다.

표 5. 시료 특성의 변화

시료	PFOT22	PFOT31	PFOT41	PFOT42	PFOT51	PFOT61
초기 간극비, e_i	0.548	0.550	0.548	0.551	0.550	0.548
최종 간극비, e_f	0.540	0.551	0.559	0.563	0.566	0.571
전단응력, kPa	0.0	52.5	83.6	83.7	70.7	56.6
변위, mm	0.0	0.30	1.19	1.52	2.90	10.3

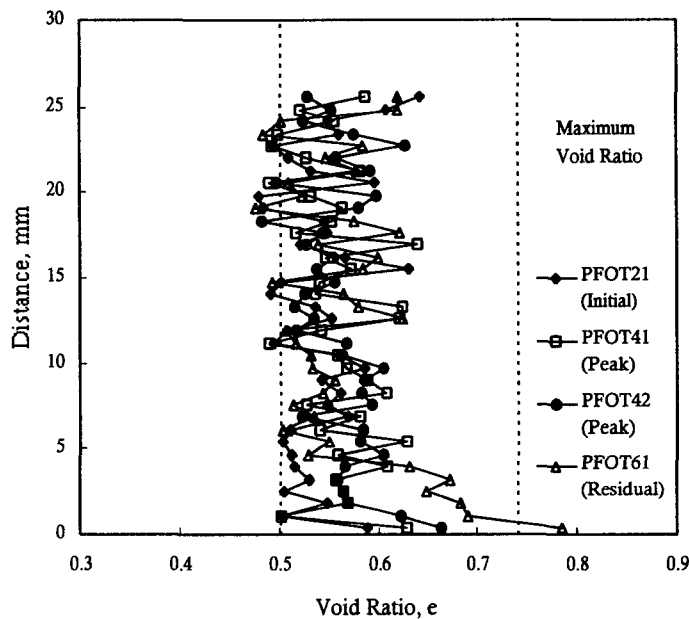


그림 6. 모래입자의 변형

전단변형이 일어나기 전의 초기상태에서는 다른 지오멤브레인과 같은 분포상태를 보여주었다. 최대응력이 발생되기 전까지는 최소의 변화를 보여주었으나 최대응력에 도달하면서 커다란 변화를 보여주었다. 즉, 그림 6에서 PFOT41과 PFOT42는 각각 최대응력의 바로 전과 후의 간극비 변화 상태를 보여주고 있는데, 그림에서 알 수 있듯이 커다란 상대적인 움직임을 보여주고 있다. 즉, 최대응력 바로 전의 경우, 접촉면 지역에서 간극비의 변화는 초기상태와 매우 유사한 경향을 보여주고 있다. 그러나, 최대응력을 바로 지나면서, 간극비는 접촉면지역에서 급격히 증가하였다. 결국, 이것은 최대응력의 발생 변위

에서 모래입자의 상대적인 움직임이 시작되었다는 것을 나타내고 있다. 모래입자는 지오멤브레인 표면에서 미끄러짐과 동시에 interlocking이 발생함을 알 수 있었다. 더욱이 dilation이 발생됨을 보여주고 있다. 전단변형이 계속 진행됨에 따라, interlocking과 dilation은 계속 발전되어 대략 접촉면에서 6개의 모래입자 높이 만큼까지 상당히 큰 간극비를 유도하였다.

위의 결과로부터 Moderately/Heavily textured 지오멤브레인과 Ottawa 20/30 모래의 접촉면에서 다음과 같은 전단 메카니즘을 유도할 수 있었다. 최대응력이 발생되기 전에는 무시할 정도의 모래입자의 움직임이 발견되었다. 그후, 최대응력이 발생하는 변위지역에서는 접촉면지역에서 모래입자의 미끄러짐과 interlocking이 발생하여 모래입자간의 dilation을 유도하여 간극비가 증가되는 경향을 보여주었다. 결국 Moderately/Heavily textured 지오멤브레인의 경우 접촉면 전단력은 모래입자간의 dilation에 의하여 발생됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서 얻어진 결론들은 다음과 같다.

- 1) 스무드 지오멤브레인의 경우, 전단 메카니즘은 주로 모래입자가 미끄러짐으로 인한 것이며, 접촉면으로부터 2개의 모래입자 높이까지만 영향을 미친다.
- 2) Slightly textured 지오멤브레인의 경우, 모래입자의 interlocking과 dilation이 발생하여 접촉면으로부터 4개의 모래입자 높이까지 영향을 미친다.
- 3) Moderately/Heavily textured 지오멤브레인의 경우, 모래입자의 interlocking과 dilation이 매우 발전되어 접촉면으로부터 6개의 모래입자 높이까지 영향을 미친다.

참고문헌

1. Dove, J. E. and Frost J. D. (1996), "A Method for Measuring Geomembrane Surface Roughness", *Geosynthetics International*, Vol. 3, No. 3, pp. 369~392.
2. Dove, J. E., Frost, J. D., Han, J. and Bachus, R. C. (1997), "The Influence of Geomembrane Surface Roughness on Interface Strength", *Geosynthetics '97*, San Diego, CA, USA, Vol. 2, pp. 863~876.
3. Jang, D. J. (1997), "Quantification of sand structure and its evolution during shearing using image analysis", *Ph.D. Dissertation*, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 259 p.
4. Jang, D. J., Frost, J. D., and Park, J. Y. (1998), "Preparation of epoxy impregnated sand coupons for image analysis", Accepted for publication in *ASTM Geotechnical Testing Journal*.
5. Kishida, H., and Uesugi, M. (1987), "Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp.45-52.
6. Lee, S. W., Frost, J. D., and Righter, G. K. (1998), "The influence of geomembrane surface roughness on geomembrane-geotextile interface strength", *Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics*, Vol. 1, pp. 433-438.
7. Lee, S-W (1999 a), "Quantification of Surface Topography Using Digital Image Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 15, No. 3. pp. 131~149.
8. Lee, S-W (1999 b), "Directional Variations in Surface Roughness Determinations", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 15, No. 4.
9. Paikowsky, S. G., Player, C. P. and Connors, P. J. (1995), "A Dual Interface Apparatus for Testing Unrestricted Friction of Soil along Solid Surfaces", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 168~193.