

역해석을 통한 복합차수시스템의 점토차수재 사면파괴 사례 연구

Back analysis on shear failure of compacted soil liner in composite liner system

이철호¹⁾, Chulho Lee, 민선홍²⁾, Sunhong Min, 최향석³⁾, Hangseok Choi, 티모시 스타크, Stark, Timothy D.⁴⁾

¹⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁴⁾ Professor of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign

SYNOPSIS : This paper deals with a case study on a unique slope failure in a liner system of a municipal solid waste containment facility during construction because the sliding interface is not the geomembrane/compacted low permeability soil liner (LPSL) but a soil/soil interface within the LPSL. From the case study, it is concluded that compaction of the LPSL should ensure that each lift is kneaded into the lower lift so a weak interface is not created in the LPSL, and the LPSL moisture content should be controlled so it does not exceed the specified value, .e.g., 3% - 4% wet of optimum, because it can lead to a weak interface in the LPSL. In addition, drainage materials should be placed over the geomembrane from the slope toe to the top to reduce the shear stresses applied to the weakest interface, and equipment should not move laterally across the slope if it is unsupported but along the slope while placing the cover soil from bottom to top.

Keywords : Slope Stability, Landfills, Geomembranes, Geosynthetics, Compacted Soil Liner, Geosynthetic lined slopes, Interface Shear Strength

1. 서론

쓰레기 매립장에는 침출수를 막기 위한 차수재로는 다짐점토나 지오멤브레인(Geomembrane)이나 GCL(Geosynthetic Clay Liner)와 같은 토목점유가 사용되며 매립장 사면의 안정성은 사면을 구성하는 요소 혹은 요소 사이의 경계면의 전단강도에 의해 좌우된다. 기존의 많은 연구에서는 지오멤브레인과 다짐점토의 경계면의 전단강도가 점토와 점토사이의 전단강도 보다 작다는 시험결과를 보여준다(Martin et al. 1984; Saxena and Wong 1984; Koerner et al. 1986; Williams and Houlihan 1987; Negussey et al 1989; Bove 1990; Mitchell et al. 1990; O'Rourke et al. 1990; Taksumi et al. 1991; Yegian and Lahlaf 1992; Stark and Poeppel 1994; Stark et al. 1996; Dove and Frost 1999; Stark and Choi 2004; Dixon et al. 2006; Amaya et al. 2006 등). 그러나, 본 논문에서는 쓰레기 매립장의 사면파괴가 일반적으로 발생하는 다짐점토 차수재와 지오멤브레인의 경계면을 따라 발생하지 않고 점토 차수재 내부에서 파괴가 발생한 사례에 대해 현장조사 결과를 분석하고 일련의 사면안정 해석을 통하여 원인을 역해석을 통하여 검토 하였다.

2. 매립장 사면파괴 사례검토

본 연구의 사례검토에서 고려한 쓰레기 매립장은 미국 북동부 Teays강 계곡에 위치해있다. Teays강은 과거 빙하에 의해 부분적으로 고운 모래, 실트, 점토가 퇴적되었고, 점토 퇴적지역은 약 25m 두께로 이루어졌으며, 액성한계 45~56%와 200번체 통과량 95%이상, 0.002mm 이하의 퇴적물 55~73%로 이루어졌다. 대상 쓰레기 매립장은 강 주변에서 확보한 점토를 사용하여 매립장 점토 차수재를 시공하였다. 사면 파괴는 쓰레기 매립장 건설기간 중인 2001년 11월 14일에 3H:1V의 경사면에서 발생하였다. 사면의 복합차수 시스템은 1.5m의 점토 차수재와 1.5mm두께의 HDPE 지오멤브레인을 시공하고, 그 위에 0.3~0.6m의 모래 배수재를 시공하였다. 그림 1, 2는 사면 상부에서 하부로 복합차수 시스템과 복합 배수층(GDL)을 시공한 사진이다. 매립장 사면 상부에서 하부방향으로 모래 배수재를 시공하는 방법은 배수재가 높은 전단응력을 견디지 못하고 전단응력이 복합차수 시스템에 전달되어 취약한 경계면을 발생시키기 때문에 추천되지 않으며, 배수재를 사면 하부에서 상부로 시공하여 전단응력과 전단변위를 감소시키는 방법이 적합하다(Giroud et al. 1995; Koerner and Soong, 1998; Stark and Choi, 2004).



그림 1. 파괴된 매립장 사면 모습



그림 2. 모래 배수재 시공 중인 사면 모습

본 매립장은 사면의 연장이 매우 길어서 충분한 두께로 사면을 복토하기 위해 상부에 모래를 쌓고 하부로 밀어내리는 방법이 사용되었으며 이런 시공방법으로 인해 사면이 파괴된 사례이다. 이때 상부의 모래는 최대 1.5~2.4m 높이로 적체되었고, 하부로 모래 배수재를 펼칠 때 사용한 도저의 접지압은 평균 34.4 kPa였다. 사면 파괴가 발생한 부근에서 도저는 모래 배수재를 펼치는 동안에 수차레 수평이동 하여 복합 차수시스템의 취약한 경계면에 전단응력을 발생 시켰다. 사면파괴는 초기에 상부 토괴가 파괴되고 연속해서 하부의 토괴가 연속적으로 파괴되는 양상을 보였다. 특히, 첫 번째 토괴의 파괴는 도저가 이동하고 있던 경사면 상부 약 3m 아래에서 시작되어 약 12m 아래까지 진행되었고, 이후의 파괴는 이전 토괴의 하부에서 시작하여 약 12m 아래까지 진행하여 연속적으로 전체 사면에 발생하였다. 그림 3은 경사면 하부에서 사면의 파괴로 인하여 지오멤브레인이 손상된 모습이며, 그림 4는 파괴면 상부에서 찍은 사진으로 지오멤브레인과 모래 배수재 아래에 위치한 파괴면을 보여주며 그림 4의 화살표가 표시한 부분을 확대한 것을 그림 5에 나타냈다.



그림 3. 사면 파괴로 인하여 손상된 지오멤브레인



그림 4. 찢겨진 지오멤브레인과 파괴면

초기 파괴면은 지오멤브레인과 점토 차수재 경계면이 아닌 점토 차수재 내부 75~150mm에서 발생하였으며, 그림 5는 찢겨진 지오멤브레인을 근접 촬영한 사진으로 파괴면이 찢겨진 지오멤브레인의 아래에서 위치한다는 것을 보여준다. 이러한 현장검토를 통하여 점토 차수재 내부 변형으로 인해 지오멤브레인이 손상되었다는 결론을 얻을 수 있다. 그림 6은 점토 차수재 내부의 파괴면이 노출된 사진으로 점토 차수재 내부 파괴면의 위치를 확인할 수 있다. 파괴면 관찰 결과, 파괴면은 특정 다짐층 경계면이 아닌 점토 차수재 내부 75~150mm에 위치한다는 것을 보여준다. 그림 6은 토괴가 매끄럽게 밀려나간 파괴면을 보여주며, 이것은 상부 토괴의 변형이 파괴면을 따라 발생할 경우 점토입자의 재배열(slikensided) 되면서 만들어진다(Amaya et al., 2006; Stark and Choi, 2004; Stark et al., 2005).



그림 5. 근접 촬영한 찢겨진 지오멤브레인



그림 6. 노출된 점토차수재의 파괴면

점토 차수재 다짐 시, 차수재의 투수계수를 1×10^{-7} cm/sec 이하로 유지하기 위해 상대다짐도를 표준다짐시험(ASTM D 698)에 대한 95% 이상과 최적함수비 보다 1%이상 큰 함수비를 만족하여야 한다. 표준다짐시험으로 구한 최대 건조단위중량과 최적함수비는 각각 45.8 kN/m^3 , 21.6%이다. 현장 다짐시험 결과 다짐 시, 각 다짐층 두께는 200mm 이내를 유지하고, Sheet foot roller를 이용하여 한 방향으로 12번 이상 다지도록 규정하고 하였다. 표 1은 점토차수재의 상부에서 3~6번째 다짐층의 건조단위중량과 함수비를 나타낸다. 3~6번 다짐층의 상대다짐도 95% 이상이며, 3, 4번 다짐층의 데이터는 최적함수비 보다 1%이상 큰 함수비(즉, 22.6%이상의 함수비)를 만족한다. 현장 다짐시험 결과, 점토 차수재의 5, 6번 다짐층이 최적함수비 보다 약 1.5~3.5% 높은 함수비로 다져졌다. 사면파괴가 발생된 후 노출된 파괴면으로부터 4개의 시료를 채취하여 측정된 함수비는 각각 24.9, 28.6, 26.5, 26.9, 평균 26.7%이다. 이는 최적함수비보다 약 2.5~5% 높은 함수비에 해당된다.

표 1. 점토차수재 3~5번 층의 다짐시험 결과

다짐 층 번호	건조단위중량 (kN/m^3)	표준다짐도 (%)	함수비 범위/평균 (%)	최적함수비와의 차이 (%)
3	15.0-15.9	95.0-100.0	22.8-26.5/25.0	1.2-4.9
4	15.1-15.3	95.5-97.1	23.2-25.5/24.2	1.6-3.9
5	15.0-15.3	95.3-97.2	22.3-26.7/25.4	0.7-5.1
6	15.0-15.7	95.1-99.8	21.6-26.7/26.0	0-5.1

3. 사면안정 해석개요

파괴된 사면에 대한 역해석은 수치해석 프로그램 SLOPE/W를 사용하여 Janbu (1957), Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967)의 사면해석 방법으로 수행하였다. 사면 안정성 해석 방법은 모든 평형상태를 만족하고 안전을 계산을 할 수 있기 때문에 역해석에 사용되기 적합하다(Duncan and Wright 1980).

역해석은 점토 차수재내에 발생한 파괴면에서 발현된 전단강도를 산정하기위해 수행되었다. 본 쓰레기 매립장의 사면파괴 발생 시, 사면형상은 풍화암 또는 사암 지반 위에 평균 3H:1V의 사면으로 이루어져 있다. 그러나, 사면파괴의 영역에서 경사면 기울기는 상부에 적재된 배수재용 모래더미를 고려하여 2.8H:1V의 경사가 되었고 사면 상부와 하부의 높이 차이는 31.4m였다. 그림 7은 역해석에 사용된 사면의 형상이다. 해석에는 도저와 배수재 시공을 위한 모래더미와 트럭이 사면상부에 고려되었고, 도저 운행으로 인한 진동은 지진계수를 통해 적용하였으며 값은 0.005를 사용하였다.

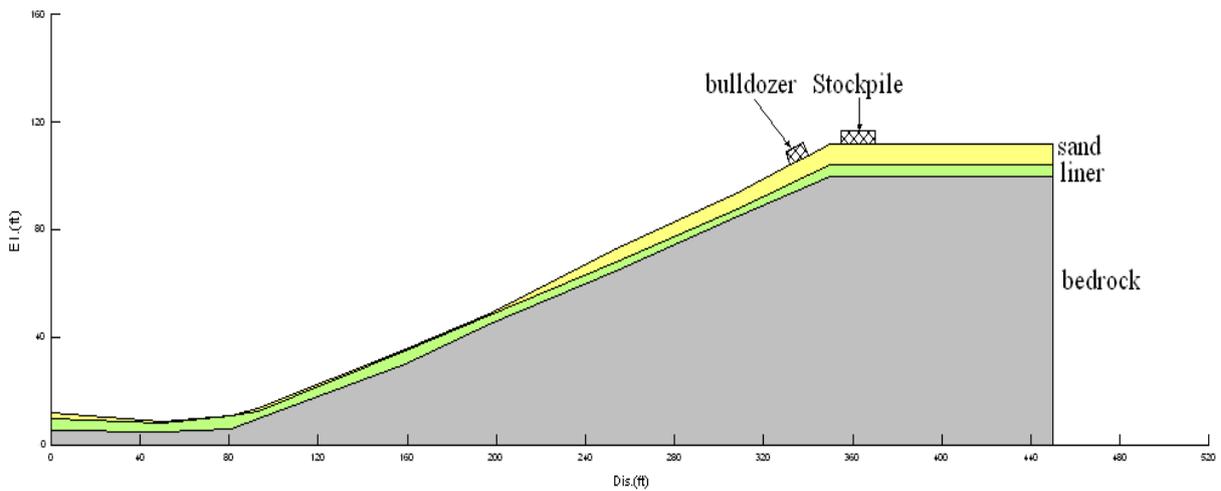


그림7. 해석에 사용된 매립장 사면

점토 차수재의 물성치는 삼축압축시험(CU test)을 이용하여 측정하였다. 현장 다짐시험 결과는 파괴 영역에서 최적함수비 보다 약 4% 큰 함수비에서 점토차수재가 다짐되었다는 것을 보여준다. 역해석에 사용되어진 물성치는 표 2에 나타내었다.

표 2. 해석에 사용된 물성치

재료	단위중량 γ_t (pcf)	점착력 c' (kPa/psf)	내부마찰각 ϕ' (°)
배수재(모래)	120	0	28
점토차수재	124	13.4/280*	19.5
풍토/기반암	135	287.3/6000	10

* 점착력은 삼축압축시험을 통해 측정하였으며 역해석을 통해 재산정함

4. 파괴사면에 대한 역해석

본 사례에서 다루는 사면파괴는 비교적 얇은파괴 형태를 가지므로 파괴면에 작용하는 유효응력이 매우 작다고 판단된다. 따라서, 사면파괴가 점착력에 의해 지배적으로 발생했을 것이라는 가정 하에 역해석을 위한 전단저항력 변수를 점착력으로 두고 해석을 수행하였다. 사면해석은 Janbu(1957), Morgenstern-Price(1965), Spencer(1967) 방법이 사용되었으며, 해석결과는 각각 그림 8~10에 나타내었다.

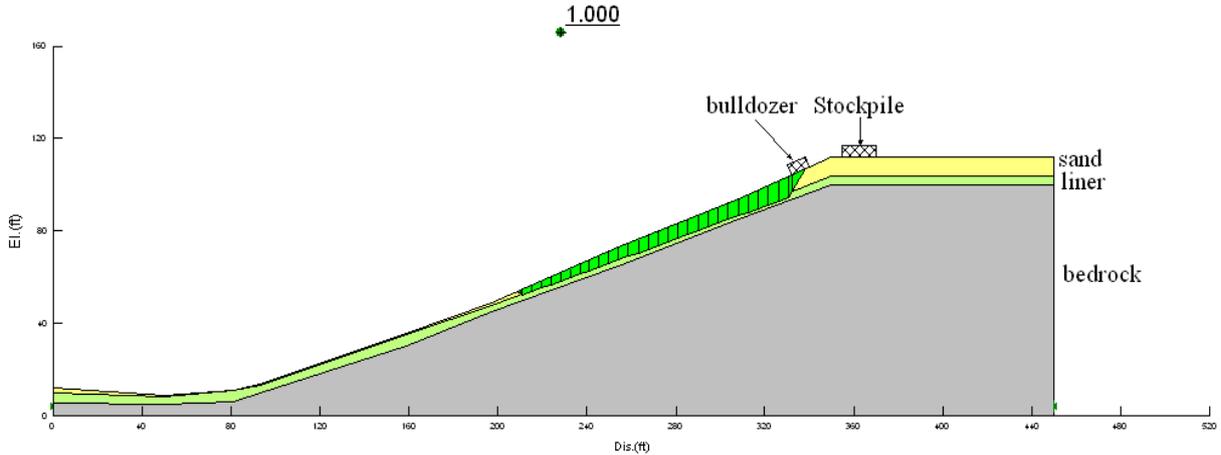


그림8. Janbu 방법을 사용한 역해석 결과

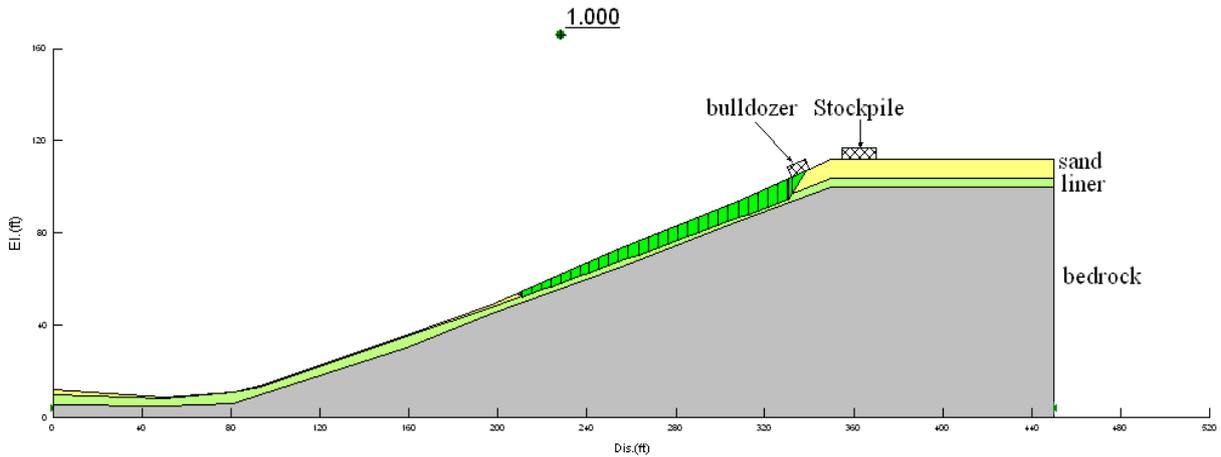


그림9. Morgenstern-Price 방법을 사용한 역해석 결과

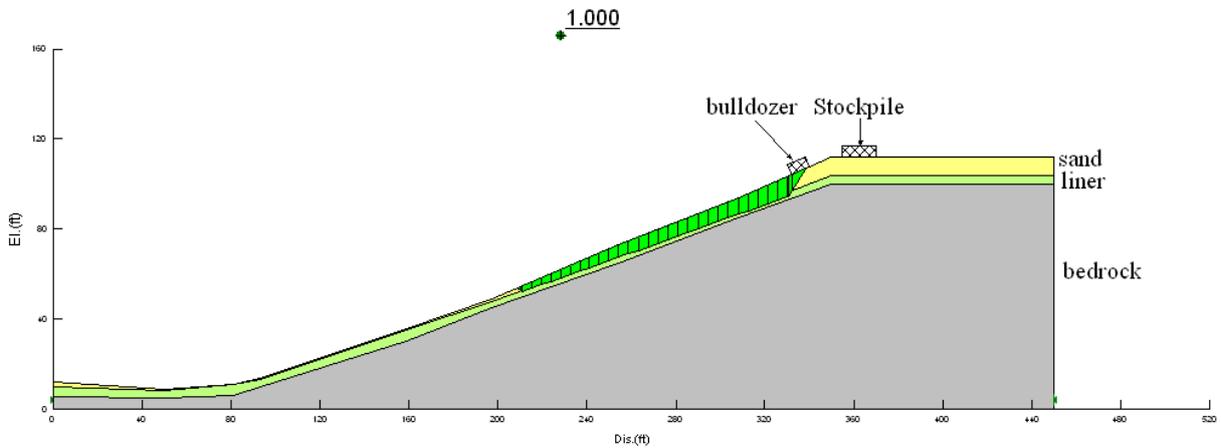


그림10. Spencer 방법을 사용한 역해석 결과

각각의 사면해석 방법별로 산정된 파괴시 발현된 점착력(mobilized cohesion)은 표 3에 나타내었다. 사면해석을 통해 역해석한 점착력은 0.9~1.4kPa로 삼축압축시험을 통해 산정한 13.4kPa에 비해 상당히 낮은 값으로 나타났다. 이 결과는 시험에 사용한 시료가 점토차수재의 현장 다짐상태와 함수비를 적절히 반영하지 못한 결과로 보인다.

표 3. 역해석한 점토차수재의 점착력

사면 조건	블도저 작동 범위	역해석된 점착력, c' (kPa/psf)		
		Janbu	Morgenstern-Price	Spencer
사면 상부의 모래더미와 트럭	수평	1.4/29.2	1.3/26.5	0.9/18.0

5. 매립장 사면 시공방법 검토

배수재 또는 복토층 시공방법에 대한 검토를 위해 모래가 매립장 사면 하부에서 상부로 시공되는 것으로 가정하고 표 2의 물성치를 사용하여 사면해석을 수행하였다. 해석에 사용된 단면은 그림 11과 같으며 배수재는 도저를 이용하여 시공하고, 경사면 하부에서 출발하여 상부로만 이동하고, 수평으로 이동하지 않는 것으로 가정하였고, 배수재 시공 시 모래는 도저의 브레이드 앞에 위치시키고 1m 높이를 초과하지 않도록 하였다. 또한, 상부에 모래더미와 트럭은 없는 것으로 가정하여 해석하였다. 모래는 매립장 사면 하부로부터 시공되어 평균 약 0.9m 두께인 것으로 가정하였다.

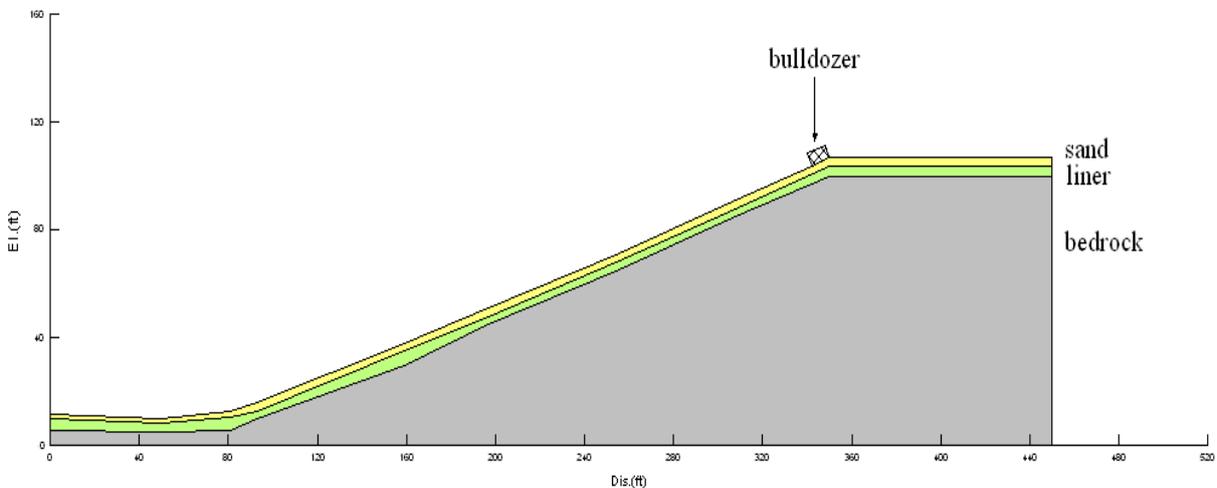


그림11. 모래 배수재가 하부에서 상부로 시공될 경우

Morgenstern-Price 방법이 다른 2가지 해석 방법에 비해 상대적으로 정확하기 때문에 Morgenstern-Price 방법으로 역해석된 점토 차수재 점착력 1.3 kPa을 적용하였다. 다른 층의 물성치는 표 1에서 제시된 값을 사용하였다. 표 4는 경사면 하부에서 상부로 배수재 설치와 같은 개선된 시공방법에 대한 3가지 해석 방법을 이용한 사면 안전율을 나타내었다.

표 4. 개선된 시공방법에 대한 사면안정성 해석결과

사면상태	도저 작동 범위	안전율		
		Janbu (1957)	Morgenstern-Price(1963)	Spencer (1967)
사면 하부에서 상부로 시공	수평이동하지 않고 상하부로 이동	1.37	1.38	1.45

해석결과 매립장 사면은 모래 배수재가 사면 하부에서 상부로 시공될 경우가 그렇지 않은 경우보다 안전한 것으로 결론 내릴 수 있으며 계산된 안전율은 Morgenstern-Price 방법의 경우 1.38로 그림 12와 같다.

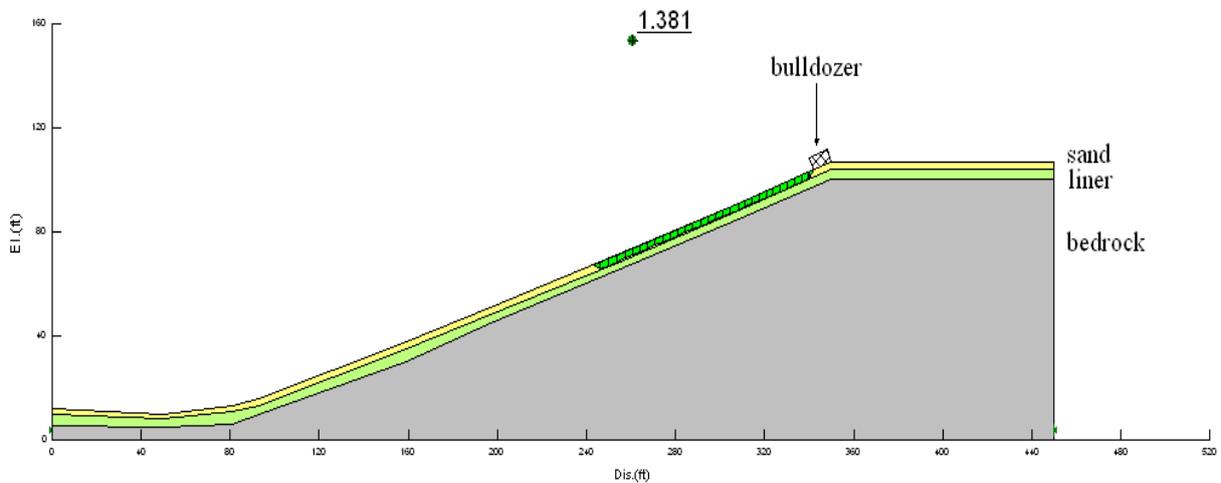


그림12. 모래 배수재가 하부에서 상부로 시공될 경우의 Morgenstern-Price 방법을 이용한 해석

6. 결론

본 연구에서는 쓰레기 매립장 사면에서 발생한 점토차수재 내부 사면파괴에 대한 사례 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점토 차수재 내부가 지오멤브레인과 점토 차수재 경계면 보다 취약하여 충분히 사면 파괴가 발생할 수 있다.
- (2) 점토 차수재 상부에 모래로 시공되는 배수재 또는 복토층은 점토 차수재 내부에서 발생할 수 있는 사면파괴를 방지하기 위해 매립장 사면 하부에서 상부로 시공되어야 한다.
- (3) 매립장 사면 시공 중 전단 응력이 차수재 취약부분에 발생하지 않도록 시공장비는 수평으로 이동하지 않아야 하며 사면 상하부로 이동하면서 시공하여야 한다.
- (4) 경사면에서 배수재 시공 시 모래는 불도저의 칼날 앞에 위치시키고, 높이는 1m이내로 한다.
- (5) 배수재의 경사는 경계면의 연속적인 파괴와 사면의 불안정을 초래할 수 있기 때문에 토목섬유 또는 점토차수재의 취약부의 전단강도를 초과하지 않아야 한다.

참고문헌

- Amaya, P., Queen, B., Stark, T. D., & Choi, H. (2006). Case history of liner veneer instability. *Geosynthetics International*, 13(1), 36-46.
- Bove, J. A., 1990, "Direct shear friction testing for geosynthetics in waste containment", Proceedings of ASTM Symposium on Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, Special Technical Publication 1081, pp. 241-256.
- Dixon, N., Jones, D.R.V., Fowmes, G.J. (2006). Interface shear strength variability and its use in reliability-based landfill stability analysis. *Geosynthetics International*, 13(1), 1-14.
- Dove, J. E. and Frost, J. D., 1999, "Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 544-555.
- Duncan, J.M. and Wright, S.G. (1980). The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis. *International Symposium of Landslides*, New Delhi, India, pp. 247-254 (also *Engineering Geology*, Vol. 16, pp. 5-17, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam)
- Giroud, J.P., Williams, N.D., Pelte, T., & Beech, J.F. (1995). Stability of geosynthetic-soil layered systems on slopes. *Geosynthetics International*, 2, No. 6, pp. 1115-1148.
- Hillman, R.P. & Stark, T.D. (2001). Shear Behavior of PVC geomembrane/geosynthetic interfaces. *Geosynthetics International Journal*, 8, No. 2, pp. 135 - 162.
- Janbu, N. (1957). "Slope stability computations", in *Embankment Dam Engineering*, Casagrande Memorial Volume, Hirschfield and Poulos (Eds.), John Wiley, New York, pp. 47-86.
- Hillman, R.P. & Stark, T.D. (2001). Shear Behavior of PVC geomembrane/geosynthetic interfaces. *Geosynthetics International Journal*, 8, No. 2, pp. 135 - 162.
- Koerner, R.M., Martin, J.P., and Koerner, G.R. (1986). Shear strength parameters between geomembranes and cohesive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 4, No. 1, pp. 21 - 31.
- Koerner, R.M. and Soong, T.-Y. (1998). "Analysis and Design of Veneer Cover Soils", Proceedings 6th International Conference on Geosynthetics - Giroud Lecture, Industrial Fabrics Association International, Roseville, Minnesota, USA, Vol. 1, pp. 1-24.
- Martin, J.P., Koerner, R.M. and Whitty, J.E. (1984). Experimental friction evaluation of slippage between geomembrane, geotextiles, and soils. *Proceedings of International Conference on Geomembranes*, Denver, CO, pp. 191-196.
- Mitchell, J. K., Seed, R. B. and Seed, H. B., 1990, "Kettleman Hills waste landfill slope failure I: liner-system properties", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 4, pp. 647-668.
- Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). "The analysis of the stability of general slip surfaces", *Geotechnique*, Vol. 15, No. 1, pp. 79-93.
- Negussey, D., Wijewickreme, W. K. D. and Vaid, Y. P., 1989, "Geomembrane interface friction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 165-169.
- O'Rourke, T. D., Druschel, S. J. and Netravali, A. N., 1990, "Shear strength characteristics of sand polymer interfaces", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 3, pp. 451-469.
- Saxena, S.K. and Wong, Y.T. (1984). Friction characteristics of a geomembrane. *Proceedings of International Conference on Geomembranes*, Denver, CO, pp. 187-190.
- Spencer, E. (1967). A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Geotechnique*, 17, No. 1, pp. 11-26.
- Stark, T. D. (1999). Stability of waste containment facilities. *Proceedings of Waste Tech '99*, National Solid Wastes Management Association, New Orleans, Louisiana, USA, February, pp.

1-24.

- Stark, T.D. and Choi, H. (2004). Peak v. residual interface strengths for landfill liner and cover design. *Geosynthetics International Journal*, 11, No. 6, pp. 491-498.
- Stark, T.D., Williamson, T. A., & Eid, H.T. (1996). HDPE geomembrane/geotextile interface shear strength. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122, No. 3, pp. 197-203.
- Stark, T. D. & Poeppel, A. R. (1994). Landfill liner interface strengths from torsional ring shear tests. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120, No. 3, pp. 597-615.
- Takasumi, D. L., Green, K. R. and Holtz, R. D., 1991, "Soil-geosynthetic interface strength characteristics: A Review of State-of-the-Art Testing Procedures", *Proceedings of Geosynthetics '91 Conference*, Atlanta, Georgia, USA, Vol. 1, pp. 87-100.
- Williams, N.D. and Houlihan, M.F. (1987). Evaluation of interface friction properties between geosynthetics and soils. *Proceedings of Geosynthetics '87 Conference*, New Orleans, LA, Vol. 2, pp. 616-627.