

매립장 사면에 설치된 토목섬유의 설계 인장강도 산정 Design Forces Acting on Geosynthetics in Landfills

정문경¹⁾, Moonkyung Chung, 김강석²⁾, Kang-Suk Kim, 우제윤³⁾, Je-Yoon Woo, 류찬희⁴⁾ Chan-Hee, Ryu

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engr. Dept., KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Engr. Dept., KICT

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Engr. Dept., KICT

⁴⁾ 아남환경주식회사 환경사업부 차장, Anam Environmental Co.

SYNOPSIS : This paper presents measured deformation of geomembrane installed on slopes of a landfill. The layout of geosynthetics installed on landfill slopes as required by regulations is composed of, in typical, geocomposite, geomembrane, geosynthetic clay liner in turn from the slope. An effort was made to better understand the sources of external forces acting on geosynthetics and their interactions. The results of a field observation indicated that tensile stresses induced on geomembrane were far less in magnitude than predicted by the design method employing mass equilibrium of waste. This was mainly because external forces acting on slopes were not transferred from geocomposite to underlying geomembrane. A simple, but rather rational method for assessing the stability of geosynthetics against tensile stresses was proposed. This method is based on a hypothesis that external forces acting on geosynthetics are the results of downdrag of waste during waste compaction.

Key words : landfill, geomembrane, geocomposite, stability, waste settlement, downdrag

1. 서 론

근래에 들어 우리나라 매립장 사면의 차수공 조성은 사면바닥으로부터 차수용인 GCL(Geosynthetic Clay Liner)과 지오멤브레인(geomembrane), 그리고 그 상부에 지오멤브레인의 보호용 토목섬유를 하는 것이 일반화되어 있다. 1999년 8월 개정된 폐기물관리법에서 사면에 설치된 토목합성수지 라이너 즉 지오멤브레인의 인장강도에 대한 안전율이 2 이상 되도록 설계, 시공할 것을 명시한 이래, 우리나라에서도 사면의 토목섬유에 작용되는 힘과 변형에 대한 직접적인 관심이 커져왔다. 매립장 사면에 설치된 토목섬유의 응력 상태를 정확히 이해하기에는 많은 변수가 서로 영향을 주므로 결코 간단하지 않다. 매립장 사면에는 응력-변형 특성이 다른 여러 겹의 토목섬유가 있고, 사면은 몇 단의 소단으로 구성되어 있으며, 각 소단 및 최상단에 토목섬유를 고정하는 방법이 제각기 다르다. 지오멤브레인은 온도의 변화에 매우 민감하게 반응하는 재료이며, 하중으로 작용하는 폐기물은 매우 불균질하며 매립 후 장기적으로 폐기물 속의 유기물질이 분해되어 침하가 발생하며, 매립을 하는 방법도 다양각색이다. 반면, 국내의를 합쳐도 이 문제와 관련한 실측 데이터 및 분석자료가 거의 없다시피 한 실정이다.

본 논문에서는 전형적인 사면의 토목섬유 조합을 갖춘 국내 매립장에서 측정한 지오멤브레인의 변형 관측을 통해 실제 매립장의 운영 조건에서 사면의 토목섬유에 작용되는 힘과 힘의 전달, 그리고 그로 인한 지오멤브레인의 인장강도에 대한 실제 안전율을 검토하였다. 지금까지 지오멤브레인의 인장력에 대한 안전율의 검토에는 폐기물의 한계평형이론에 기초한 계산법(Koerner, 1994)이 사용되었다. 본 논문

양면 지오텍스타일이 접착된 지오킴포지트가 설치되었다. 소단에서 지오킴포지트는 융착되지 않고 여유 폭을 두고 그림에서와 같이 겹쳐있다. 지오킴포지트의 주기능은 지오멤브레인을 보호하는 것이므로 만약 매립과정에서 당김 하중이 발생하면 지오킴포지트가 따라서 내려갈 수 있도록 한 조치이다. 사면 최상단에 모든 토목섬유는 트랜치에 묻어 고정하였다.

매립장 사면의 1구역과 2구역 두 개소에 계측구역을 마련하였다. 각 계측구역에는 두개의 계측지점을 지오멤브레인 간의 융접부위에서 가장 멀리 떨어진, 지오멤브레인 단위 폭의 중심 근처에 그리고 각 소단에서 직고 약 0.5m 아래 지점에 그림 2와 같이 두었다. 매립장 시공이 완료된 직후 계측지점에 최상부 토목섬유인 지오킴포지트를 L 형태의 덮개 형태로 적당한 크기로 절단하고, 지오멤브레인에 정밀하게 가로 50mm, 세로 400mm의 직사각형을 표시하였다. 계측점은 두 개의 구역이므로 각 단에서 A,B,C,D 4개 직사각형이며, 3개의 단이므로 모두 12개 직사각형이며 각 직사각형의 종방향 두 개씩의 변의 길이 변화가 관심사이다. 초기값을 기록한 후 매립이 진행함에 따라 오전과 오후에 각 직사각형 변의 길이, 대기 온도와 지오멤브레인의 온도, 매립고를 측정하였다. 지오멤브레인의 온도는 온도계를 지오멤브레인에 대고 측정하였다.

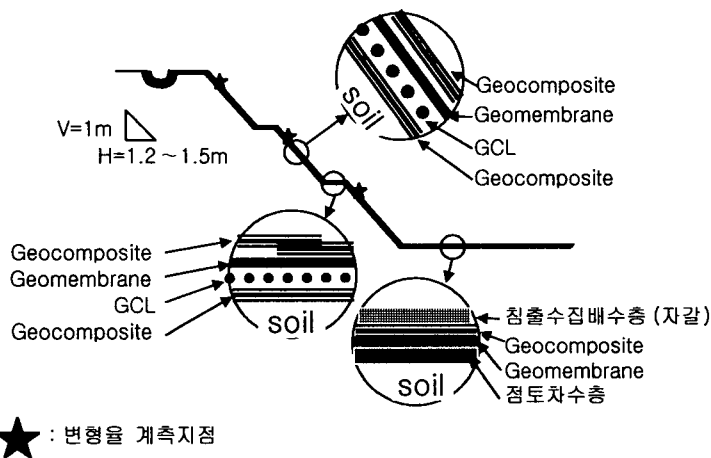


그림 1 계측지점의 단면도와 사면 토목섬유의 구성

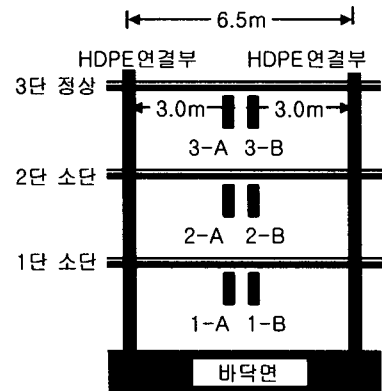


그림 2 계측지점 정면도

2.1 계측결과 및 분석

그림 3에 시간에 따른 매립 폐기물의 높이, 계측 당일의 온도, 그리고 각 단에서 직사각형 A에서 계측한 지오멤브레인의 변형 추이를 나타내었다. 다른 계측지점에서도 대차 없는 변형 거동을 관찰할 수 있었다. 2000년 6월 8일에 초기값을 읽은 후 일정한 간격으로 계측하였다. 7월 3일 폐기물의 높이가 2.5m인 것을 시작으로 8월 14일에는 매립고가 8m로 최하단, 즉 1단이 모두 매립되었다.

폐기물의 매립과 관계없이 지오멤브레인의 변형은 진행되는 것처럼 보이며, 변형율은 계측기간 동안 최대 0.8%를 넘지 않았다. HDPE 지오멤브레인의 항복응력에 해당하는 변형율이 12%이고, 법에서 요구하는 안전율이 2이므로 허용 변형율은 6%이다. 항복점까지 선형의 응력-변위 특성이 있다고 가정한다면 관찰된 1% 미만의 변형율은 매우 작은 값이다. 매립이 시작된 이후로도 매립작업으로부터 유발된 하중에 의한 직접적인 지오멤브레인의 변형은 뚜렷하지 않았다. 최하단인 1단에서 매립이 시작되기 전까지 온도차에 의한 변형이 최대 약 0.3% 관찰되었다.

지오멤브레인에 인장 변형이 유발되지 않은 것은 상부의 보호용 토목섬유가 있었기 때문이다. 보호용 토목섬유가 최상단의 고정단 혹은 소단에서의 이음새 부분에서 폐기물의 당김 작용에 의해 전체적으로 빠져 나왔던지 혹은 더욱 가능성이 높은 추론으로서 고정단 혹은 소단에서 빠지지 않고 단지 하중에 의해 늘어남으로써, 하부에 있는 지오멤브레인에 하중이 전달되지 않았던 것으로 보인다. 수 년 전에 보호용 토목섬유가 없이 지오멤브레인만 설치된 경우 매립이 진행됨에 따라 지오멤브레인이 매우 팽팽하게

당겨져 있는 것을 목격할 수 있는 것에 반해, 보호용 토목섬유가 설치된 곳에서는 지오멤브레인의 당겨짐 정도가 훨씬 덜 하였던 현장 관측 결과와 같은 맥락이다. 현재까지의 경과를 볼 때 만약 보호용 토목섬유가 인장력에 의해 늘어나다가 파괴되지만 않는다면 그 하부 차수층으로서 가장 중요한 요소 중의 하나인 지오멤브레인은 인장력에 대한 안전율이 확보될 수 있는 것으로 판단된다. 본 현장계측은 매우 간단한 방법을 사용하였으므로 지오멤브레인을 포함한 사면의 토목섬유 각각의 거동에 영향을 미치는 여러 가지 요소와 그 영향결과를 치밀히 설명하기에 부족하지만, 적어도 보호용 토목섬유의 역할과 그로 인한 하부 지오멤브레인에 발생하는 외부하중에 의한 변형의 정도는 확인할 수 있었다.

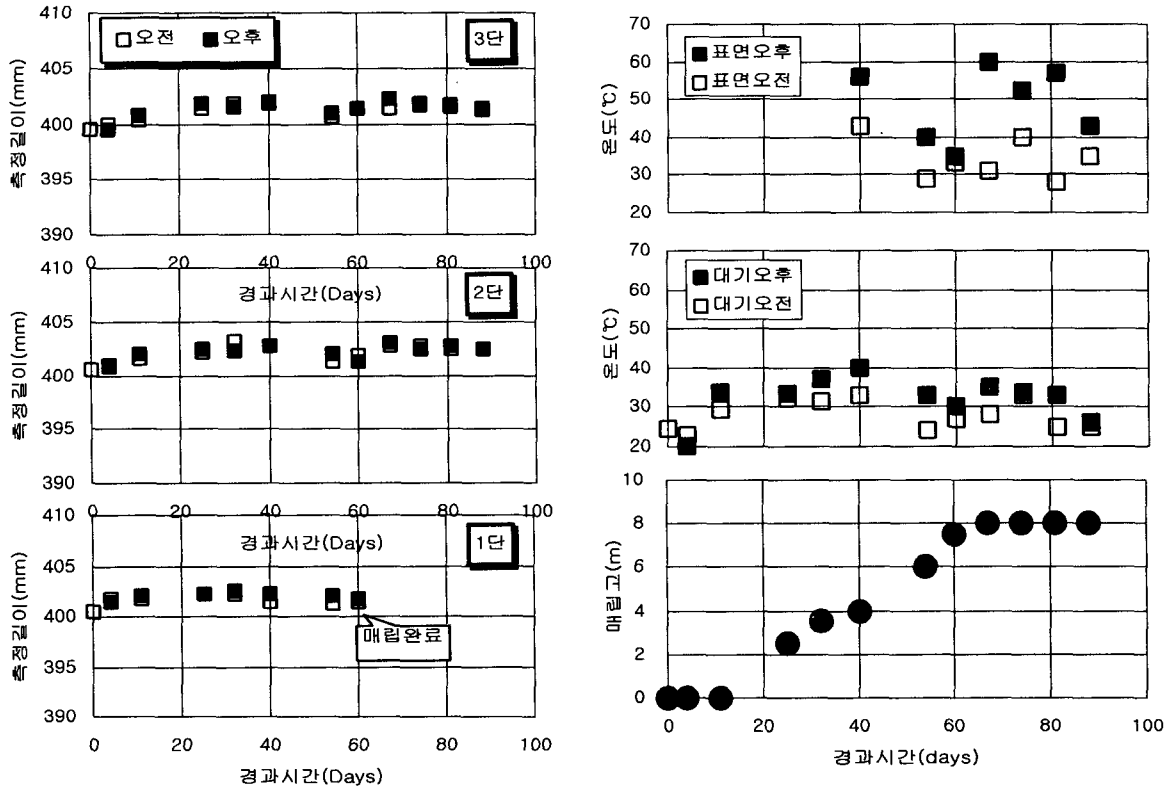


그림 3 시간에 따른 매립고, 온도, 지오멤브레인 변형 관측결과 - 계측지점은 1구역 A사각형

3. 사면에 설치된 토목섬유의 인장력 산정

3.1 한계평형이론에 기초한 설계법의 검토

국내 매립지 설계에서 지오멤브레인의 인장강도에 대한 안정성 검토에서 흔히 사용되는 방법은 (1) 매립된 폐기물의 한계평형이론에 기초하여 토목섬유에 작용하는 외력을 산정(Koerner, 1994)하고, (2) 산정된 외력이 사면의 각 토목섬유의 마찰을 통해 유발시키는 인장력을 구하는 것으로 구성되어 있다. 여기에서는 한계평형법의 오류를 지적하고자 한다. 그림 4와 같은 간단한 매립지를 상상해 보자. 이 모델에서는 그림 4의 점선으로 경계지어진 매립지 사면위 삼각형 썰기가 아래로 내려가는 파괴 메카니즘을 가정하고 있다. 썰기의 무게 $W_{sw}(\text{ton/m})$ 만큼 아래로 내려오고 점선을 따라 폐기물의 마찰에 의한 저항 $T_{sw}(\text{ton/m})$ 가 작용하며 유효 수직력 $W_{net}(\text{ton/m})$ 는 두힘의 차이이다. 즉,

$$W_{net} = W_{sw} - T_{sw} = \frac{1}{2} v_{sw} H \frac{H}{\tan \beta} - (1 - \sin \phi_{sw}) \left(\frac{1}{2} v_{sw} H \right) \tan \phi_{sw} H \quad (1)$$

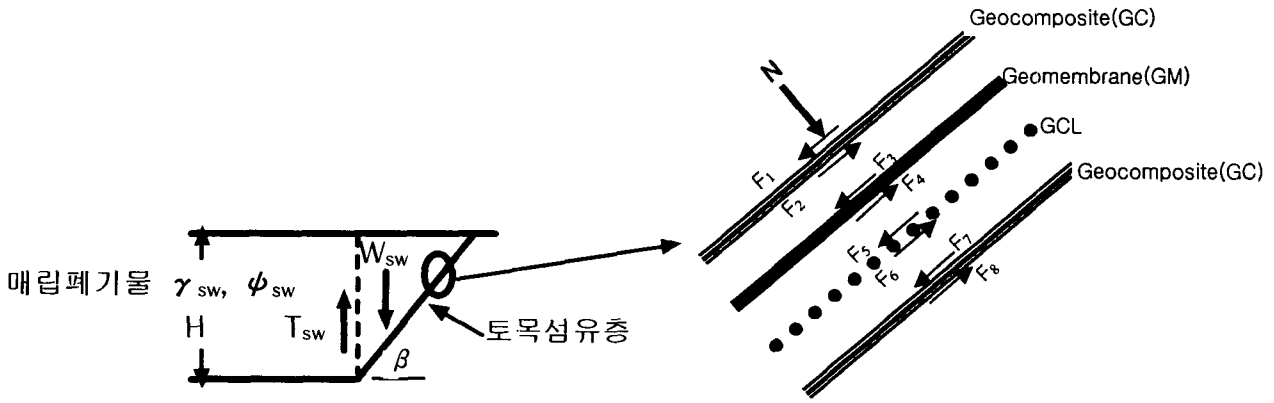


그림 4 매립장 사면의 단면 예

여기서, γ_{sw} (ton/m³)은 폐기물의 단위하중, H(m)는 매립고, β (degree)는 사면의 각도이다. 사면에 수직으로 작용되는 힘 N(ton/m)은

$$N = W_{net} \times \cos\beta \quad (2)$$

여기까지가 한계평형법에 의한 사면에 작용되는 수직력의 계산이다. 계산된 수직력으로부터 사면에 설치된 토목섬유 부재의 인장력을 구하는 방법은 본 논문에서 제안한 설계법에서도 그대로 채택하였다.

최상단 지오컴포지트와 그 하부 지오멤브레인에 발생하는 힘 F_{GC} (ton/m)와 F_{GM} (ton/m)은 각각

$$F_{GC} = F_1 - F_2 = N \times (\tan\phi_{SW-GC} - \tan\phi_{GC-GM}) \quad (3)$$

$$F_{GM} = F_3 - F_4 = N \times (\tan\phi_{GC-GM} - \tan\phi_{GM-GCL}) \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 인접한 두 물질간의 마찰각이고 아래첨자 SW는 폐기물, GC는 지오컴포지트, GM은 지오멤브레인, GCL은 벤토나이트 메트를 가리킨다. 사면에 설치된 토목섬유에 수직으로 작용하는 힘에 의해 마찰력이 발생하며 각 부재의 인장력은 해당 부재와 접하고 있는 상하부 부재간의 마찰력의 차이이다. 인접한 두 물체는 완전히 서로 접하고 마찰력은 변형에 관계없이 최대치가 유발된다고 가정하고 있다.

간단한 경우에 대해서 위의 계산방법을 적용하여 보자. 그림 4와 같이 한 단으로만 구성된 매립장에서 H=8m, $\gamma_{sw}=1.2\text{ton/m}^3$, $\phi_{sw}=35^\circ$, $\beta=33.7^\circ$, $\phi_{SW-GC}=23^\circ$, $\phi_{GC-GM}=12^\circ$, 지오컴포지트의 파괴강도 $F_{f,GC}=2.4\text{ton/m}$, 두께 2mm인 지오멤브레인의 항복강도 $F_{y,GM}=3.6\text{ton/m}$ 라 놓고 식1~식4에 대입하여 계산하면, $W_{sw}=57.6\text{ton/m}$, $T_{sw}=11.5\text{ton/m}$, $W_{net}=46.1\text{ton/m}$, $N=38.4\text{ton/m}$, $F_{GC}=8.1\text{ton/m}$ 이다. 실제로는 파괴되지 않는 지오컴포지트는 이미 계산상으로 파괴되었다. 법에는 지오멤브레인의 인장력에 대한 안전율만 명시하고 있지만, 여기에는 상부의 보호용 토목섬유는 파괴되지 않고 보호기능을 유지, 발휘하여야 하는 것을 전제로 하고 있다. 따라서 F_{GC} 가 $F_{f,GC}$ 보다 적은 경우에만 식 4를 이용하여 F_{GM} 을 구할 수 있다. 지오컴포지트가 이미 파괴된 경우에는 폐기물과 지오멤브레인은 직접 닿았다고 보아야 하며 따라서

$$F_{GM} = N \times (\tan\phi_{SW-GM} - \tan\phi_{GM-GCL}) \quad (5)$$

이라 하는 것이 합당하다. 폐기물과 지오멤브레인의 마찰효율 δ 가 0.6이라 하면 두 물질의 마찰각은 $0.6 \times 35^\circ = 21^\circ$ 이다. 식 5 이용하여 구하면 $F_{GM}=9.3\text{ton/m}$, 안전율 $f_s = 3.6/9.3 = 0.38$ 로서 지오멤브레인도 파괴되는 것으로 계산된다. 그러나, 실제 많은 매립장에서 매립고 8m에서 지오컴포지트가 파괴되지 않았으며, 보호용 토목섬유가 없는 경우에도 같은 조건에서 지오멤브레인도 파괴되지 않았다. 여러 개의 소단을 가진 매립장의 경우라면 한계평형법에 의해 파괴면을 가정하고 폐기물의 썩기하중을 구하는 것은 더욱 비현실적으로 될 수 밖에 없다.

Koerner(2000)는 그림 4의 썩기 파괴면에서의 마찰저항을 수정하여 W_{net} 의 수직분력을 크게 줄이는

수동저항을 고려하는 것이 더 합리적이라 하였다. 수동저항을 고려하면 썰기형태의 파괴는 일어나지 않는다. 한편 토압이론에서 말하는 삼각형의 썰기 파괴는 파괴가 일어나기 위한 변형이 반드시 동반되어야 한다. 이것이 Giroud et al. (1995)와 Koerner and Soon(1998)에 제시한대로 토목섬유에 유발되는 인장력은 최상단 토목섬유 상부에 설치되는 골재 침출수 집배수층의 사면안정에 기인한다는 방법으로 선회한 이유이다.

3.2 새로운 모델의 제안

한 개의 단으로만 구성된 매립장에서 사면 토공이 완료되면 순차적으로 사면의 바닥으로부터 서로 다른 토목섬유들이 사면 상단에 고정되어 포설되고, 쓰레기가 적당한 높이로 단계적으로 매립된다. 몇 가지 가정을 하면, 토목섬유는 서로 밀착하여 설치되었고 토목섬유간 서로 다른 응력-변형 특성(strain incompatibility)의 영향은 없으며 토목섬유간 접촉면에는 최대 마찰각이 유발된다고 하자. 온도와 쓰레기의 유기물질 부패에 의한 장기적 침하의 영향과 온도의 영향은 무시한다.

토목섬유의 마찰에 의한 인장력이 발생하기 위해서는 마찰력을 유발시키기 위한 변형이 발생하여야 한다. 어떤 마찰면에 발생하는 마찰력은 마찰면의 수직방향에 작용하는 힘(N)과 마찰면에서 두 물질간의 마찰계수($\tan \delta$)의 곱이다. 즉,

$$F = N \times \tan \delta \quad (6)$$

폐기물이 매립되는 과정에서 폐기물층의 내부에는 특정한 파괴면을 가지는 파괴가 없으므로 토목섬유에 인장력을 발생시키는 변형은 없을 것이다. 그렇다면 폐기물과 사면의 토목섬유 사이에 마찰력을 발생시키는 변형은 폐기물 매립시 장비에 의한 폐기물의 침하이다. 따라서 이 때의 힘을 구하고 그림 4와 같이 썰기 사면의 직각방향 성분을 구하여 연차적으로 토목섬유 각 부재에 발생하는 마찰력을 구하면 된다. 즉, 사면에 작용하는 수직방향력 N은

$$N = N_{bd} + N_{sw} \quad (7)$$

여기서 N_{bd} (ton/m)와 N_{sw} (ton/m)는 각각 불도저의 하중으로 인해 발생하는 힘과 쓰레기의 침하로 인해 발생하는 힘의 사면에 대한 수직방향성분이다. 이는 점토에 설치된 말뚝에서 주변의 점토가 침하하면서 말뚝 주변에 유발되는 부마찰력의 경우와 원리에서 같으므로 부마찰력의 개념으로 문제 풀이를 시도할 수 있다. 본 모델은 일회 매립하여 다짐한 높이의 폐기물에서 전압작업으로 폐기물이 침하하면서 사면의 토목섬유를 끌어내리려는 인장력이 발생한다고 가정한다. 그리고 다음단계의 매립 작업으로 전차 매립된 폐기물은 침하되지 않는다고 가정한다.

3.2.1 전압장비 하중에 의한 힘의 사면방향 수직방향 성분, N_{bd}

전압장비와 매립방법에서 가정사항은 다음과 같다. 그림 5와 같이 전압장비는 무게 Q(ton)인 불도저이며 무한궤도의 폭은 b(m)이다. 폐기물을 한번에 높이 h(m)씩 전압하며 사면과 평행한 방향으로 움직이는 불도저는 사면으로부터 최대 D(m)까지만 진입한다. 불도저의 하중은 무한궤도를 통해 폐기물로 전달되는데 연속기초와 직사각형 기초인 경우로 구분하였고, 불도저와 사면의 이격거리 D는 1.0m와 1.5m의 경우를 고려하였다. 일회 매립고 h는 2m로 하였고, $\gamma_{sw}=1.2\text{ton}/\text{m}^3$, $\phi_{sw}=35^\circ$ 라 하였다.

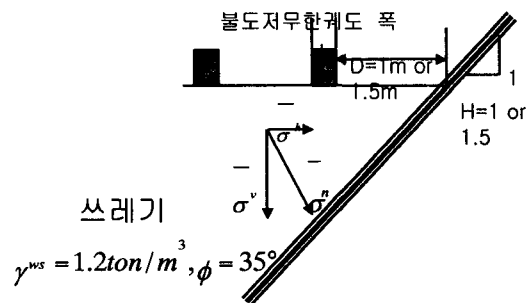


그림 5 매립장 개략도

불도저 하중으로 인해 유발된 수직응력의 사면 길이에 걸친 평균값이 $\overline{\sigma}_v(\text{ton/m}^2)$ 이면,

$$\overline{\sigma}_v = q_o \overline{I}_o \quad (8)$$

여기서 $q_o(\text{ton/m}^2)$ 는 장비하중의 접지압으로서 연속기초라 가정하면 단위 길이당 $(Q/2)/b$ 이며, $b(\text{m})$ 는 무한궤도의 폭, \overline{I}_o 는 일회 매립고에서 장비하중으로 인한 수직응력 증가분의 평균영향인자이다. 수평응력의 평균값 $\overline{\sigma}_h(\text{ton/m}^2)$ 는

$$\overline{\sigma}_h = K_o \overline{\sigma}_v = (1 - \sin\phi_{sw}) \overline{\sigma}_v \quad (9)$$

사면에 수직방향으로 작용하는 힘 $\overline{\sigma}_n(\text{ton/m}^2)$ 은 응용역학 이론으로부터

$$\overline{\sigma}_n = \frac{\overline{\sigma}_v + \overline{\sigma}_h}{2} + \frac{\overline{\sigma}_v - \overline{\sigma}_h}{2} \cos 2\beta \quad (10)$$

여기서 β 는 사면의 각도이다. 장비하중에 의한 사면에 수직인 방향의 힘 $N_{bd}(\text{ton/m})$ 는

$$N_{bd} = C_1 \times \overline{\sigma}_n \times L' = C_1 \times \overline{\sigma}_n \times \frac{d_e}{\sin\beta} \quad (11)$$

여기서 $L'(\text{m})$ 은 장비하중의 영향을 받은 유효사면길이이고 C_1 은 감소계수이다. 폐기물은 탄성체가 아니므로 응력 전달 과정에서 응력감소가 발생할 것이며 이는 페타이어나 비닐을 포함한 흙에서 다짐도의 감소현상 혹은 EPS로 성토뒤틀채움을 한 경우 가해진 수직응력에 대한 수평응력이 매우 적은 것과 같은 논리이다. $d_e(\text{m})$ 는 1회 매립고에서 장비하중에 의해 수직응력이 증가하는 영향깊이로서 그림 6과 같은 영향인자 도표에서 찾는다.

[계산예 1] 규격 20ton의 불도저 하중을 연속기초로 놓고 1:1 사면에서 매립하는 경우이다. $b=0.5\text{m}$, $D=1.0\text{m}$, $h=2\text{m}$, $v_{sw}=1.2\text{ton/m}^3$, $\phi_{sw}=35^\circ$ 일 때, 사면에 수직방향으로 작용되는 힘 N_{bd} 를 구하라. 단 감소계수 C_1 은 1이라 하자.

- $q_o = (Q/2)/b = (20/2)/0.5 = 20 \text{ ton/m}$
- q_o 로 인해 사면을 따라 폐기물에 유발된 수직응력은 Boussinesq 식으로부터 도출된 영향인자 도표(Bowles, 1988)로부터 구하면 그림 6에서 $\overline{I}_o = 0.153$ 이다.
- 유효깊이 d_e 는 도표에서 $2-0.5 = 1.5\text{m}$ 이다. 따라서,
- $\overline{\sigma}_v = 20 \times 0.153 = 3.06 \text{ (ton/m}^2\text{)}$,
- $\overline{\sigma}_h = 3.06 \times (1 - \sin 35) = 1.30 \text{ (ton/m}^2\text{)}$
- $\overline{\sigma}_n = \frac{3.06+1.30}{2} + \frac{3.06-1.30}{2} \cos 90.0 = 2.18 \text{ (ton/m}^2\text{)}$
- $N_{bd} = 2.18 \times \frac{1.5}{\sin 45} = 4.62 \text{ (ton/m}^2\text{)}$

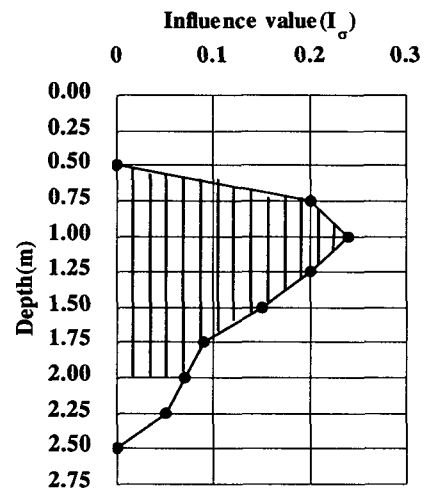


그림 6 연속기초의 influence value

장비하중분포형식, 사면경사, 이격거리의 조합에 대해서 위와 같이 계산한 결과를 표 1에 정리하였다. 장비하중을 고려할 때 연속기초로 가정하는 것이 직사각형 기초보다 더욱 합리적이고 안전측의 설계이다. 장비하중과 장비에 의한 폐기물의 침하를 계산할 때 사면을 따라 단위 길이로 계산을 하며, 무한궤도의 폭이 길이에 비해 충분히 작기 때문이다.

표 1 전압장비에 의해 사면에 직각방향으로 발생한 힘 N_{bd} (ton/m) - 감소계수 $C_1=1$ 의 조건임

장비의 재원	기초형식	접지응력 q_0	사면 경사	장비와 사면의 이격거리, $D(m)$	사면의 수직방향력 N_{bd} (ton/m)
불도저 하중 $Q=20\text{ton}$ 무한계도길이 2.25m 무한계도폭 $b=0.5\text{m}$	연속기초	20 ton/m	1:1.0	1.0	4.62
				1.5	2.59
	직사각형기초	8.91 ton/m ²	1:1.5	1.0	7.26
				1.5	5.87
			1:1.0	1.0	2.42
				1.5	1.50
1:1.5	1.0	3.15			
	1.5	2.54			

3.2.2 전압에 의한 쓰레기의 침하로 유발되는 힘의 사면에 대한 수직방향 성분

매립작업 중 장비하중에 의한 폐기물의 침하로 발생하는 수직방향력 N_{sw} (ton/m)는 부마찰력의 개념으로 계산한다. 한번에 매립되는 폐기물의 높이 h (m)에서만 장비하중에 의한 침하와 그로 인한 부마찰력이 생긴다고 가정하였다. 따라서 다음 단계의 매립에서는 전차 매립된 폐기물에는 침하가 발생하지 않으며 부마찰력도 없다. 폐기물 침하에 의해 최상부 토목섬유에 작용하는 수직방향의 힘 N_{sw} (ton/m)는 재료의 거동특성 및 지반의 특성을 고려한 안전인자를 고려하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$N_{ws} = C_2 \times \bar{\sigma}_{n,sw} \times L' = C_2 \times \bar{\sigma}_{n,sw} \times \left(0.8 \times \frac{h}{\sin\beta}\right) \quad (12)$$

여기서 C_2 는 최상단 토목섬유가 마찰에 의해 신장되므로 부마찰력이 감소하는 것을 고려한 감소인자이며, 토목섬유가 외부의 변형보다 적은 속도로 미끄러지는 경우에도 해당된다. h (m)는 일회 매립고, β 는 사면의 경사이다. 또한 L' 은 부마찰력이 작용하는 유효사면길이이다. 부마찰력이 작용하는 유효깊이는 말뚝이 설치되어 있는 지지층의 굳기에 따라 달라지며 소위 중립점의 위치에 의해 결정된다. 말뚝 주변의 압밀층 두께를 H 라 하고 부마찰력이 발생하는 중립층까지의 두께를 nH 라고 할 때 n 값은: (1) 마찰 말뚝이나 불완전 지지말뚝의 경우 $n=0.8$, (2) 보통의 모래, 모래자갈층에 지지된 경우 $n=0.9$, (3) 암반이나 굳은 지층에 완전 지지된 경우 $n=1.0$ 이다(건설부, 1986). 본 논문에서는 불완전 지지의 경우라 보고 $n=0.8$ 을 사용하였다.

[계산예 2] 사면경사는 $V:H=1:1.5$ 이고, 일회매립고 $h=2\text{m}$, 폐기물의 단위중량 $\gamma_{sw}=1.2\text{ton/m}^3$, 폐기물의 마찰각 $\phi_{sw}=35^\circ$ 일 때, 폐기물침하로 인한 사면 최상부 토목섬유의 직각방향으로 작용하는 힘 N_{sw} 를 구하라. 단 마찰력 작용시 토목섬유의 신장으로 인한 마찰력 감소를 20%로 가정하여 감소계수 C_2 는 0.8을 사용한다.

$$\bar{\sigma}_{v,ws} = 1.2 \times 1 = 1.2 \quad (\text{ton/m}^2), \quad \bar{\sigma}_{n,ws} = 0.426 \times 1.2 = 0.51 \quad (\text{ton/m}^2)$$

$$\bar{\sigma}_{n,ws} = \frac{1.2+0.51}{2} + \frac{1.2-0.51}{2} \cos 67.38 = 0.99 \quad (\text{ton/m}^2), \quad L' = 0.8 \times \frac{2.0}{\sin 33.69} \approx 2.88 \quad (\text{m})$$

$$N_{sw} = 0.8 \times 0.99 \times 2.88 = 2.28 \quad (\text{ton/m})$$

3.2.3 토목섬유의 인장력에 대한 안정성 검토

기울기 1:1.5 사면에서 20ton 급 불도저가 사면과 이격거리 1.0m로 일회 2m 썩의 폐기물을 매립할 때 토목섬유의 인장력을 검토해보자 $F_{f,GC} = 2.4\text{ton/m}$, $F_{y,GM} = 3.6\text{ton/m}$, $\phi_{sw-GC} = 23^\circ$, $\phi_{GC-GM} = 12^\circ$, $\phi_{GM-GCL} = 8.5^\circ$ 라 하자.

표 1에서 $N_{bd}=7.26\text{ton/m}$ 를 구하고 계산예 2에서 $N_{sw}=2.28\text{ton/m}$ 를 구한 후, 식7로부터 사면에 직각방향으로 작용하는 힘 $N(\text{ton/m})$ 은 $N = N_{bd} + N_{sw} = 7.26 + 2.28 = 9.54 \text{ ton/m}$ 이다. 최상부 지오컴포지트에 작용하는 인장력 F_{GC} 는 식3으로부터 $F_{GC}=9.54 \times (\tan 23 - \tan 12) = 2.02 \text{ ton/m}$ 이므로 $F_{f,GC}$ 보다 적어 지오컴포지트는 안전하다.

지오컴포지트가 파괴되지 않은 상태이므로 지오멤브레인에 작용하는 인장력은 식4으로 구한다. 따라서, $F_{GM}=9.54 \times (\tan 12 - \tan 8.5) = 0.60 \text{ ton/m}$ 이며, 안전율은 $3.6/0.6=6$ 이다.

지금까지 N_{bd} 의 계산에서 재료의 특성상 반드시 발생할 것으로 생각되는 응력전달의 감소를 고려하지 않았는데, 감소계수 C_1 을 적용한다면 N_{bd} 는 표1에서 구한 값보다 더 적을 것이다. 이는 그림 3과 제2장에서 설명한 실제 매립장에서 관찰되는 지오컴포지트와 지오멤브레인의 인장력에 대한 안정성 결과를 뒷받침하는 계산방법이 될 수 있다.

4. 결론

우리나라에서 매립장의 대표적인 단면을 가진 실제 매립장에서 매립이 진행됨에 따라 지오멤브레인에 유발되는 변형을 측정하였다. 측정결과 지오멤브레인 상부에 설치된 토목섬유가 파괴되지 않는 상황이라면, 매립과정에서 유발되는 인장력을 보호용 토목섬유가 흡수하여 신장됨으로써 하부 지오멤브레인에 인장력이 거의 전달되지 않는 것을 알 수 있었다. 사면의 직고가 8m이며 세로1: 가로1.5의 경사를 가진 3단 사면으로 구성된 매립장에서 1단까지 매립된 현재, 지오멤브레인에서 계측된 인장변형율은 최대 1%를 넘지 않았다.

사면에 설치된 토목섬유의 인장강도에 대한 안전율 계산에 흔히 사용되는 소위 한계평형이론에 기초한 설계법은 실제 상황보다 과다한 인장력을 주어 실제 상황에서는 파괴되지 않는 보호용 토목섬유나 지오멤브레인의 안전율을 확보할 수 없다. 본 논문에서는 토목섬유에 유발되는 인장력은 폐기물 매립과정에서 전압장비 하중에 의한 폐기물의 침하에 의해 발생한다는 가정 아래 간단한 설계법을 제시하였다. 사면의 경사, 일회 매립고, 전압장비 중량, 전압장비와 사면의 이격거리를 함수로 제안된 설계법으로 계산한 결과를 제시하였다. 비교를 위해 장비의 하중을 독립기초와 연속기초의 경우 모두 검토하였으나 연속기초로 보는 것이 합리적이고 안전측의 설계이다. 사면에 수직방향으로 작용하는 힘을 구한 다음 사면 토목섬유 각 부재의 인장력을 구하는 방법은 기존의 같은 방법을 택하였다.

참고문헌

1. 건설부 (1986), 구조물기초설계기준
2. Bowles, J.E. (1988). Foundation Analysis and Design, 4th Ed., McGraw-Hill Inc.
3. Giroud, J.P., Williams, N.D., Pelte, T. and Beech, J.F. (1995). "Stability of Geosynthetic Lining Systems", Geosynthetic International, Vol. 2, No. 6, pp. 1115-1148.
4. Kerner, R.M. (2000). "Clarification of R.M Koerner Stability Analysis", Personal Communication - Letter to
5. Koerner, R.M. (1994). Designing with Geosynthetics, 3rd Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
6. Koerner, R.M. and Soon, T.Y. (1998). "Analysis and Design of Veneer Cover Soils", Giroud Lecture, Proc. of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, USA, March 25-29.