토목섬유 튜브 구조물 안정해석 사례

홍은수
(주)본이앤씨 / 상무
esh6750@nate.com

1. 머리말

우리나라는 산지가 전체 국토면적의 70%에 달하여 사용 가능한 토지 면적이 작기 때문에 효율적인 국토 이용을 위하여 서남해안을 중심으로 새만금 산업단지 조성공사와 같은 대규모 해면간척 등을 통한 부지조성이 지속적으로 수행되었다. 해면간척을 통한 부지조성은 방조제로 해수를 차단하여 간척지를 육지화 하는 것으로부터 시작되며, 경우에 따라 간척지 내부에 부지 분할을 위하여 내부호안을 두기도 한다. 방조제는 대부분 파랑 등에 대한 보호를 이유로 사석제로 시공하는 경우가 대부분이다. 그러나 소요되는 사석의 물량이 많고 현장

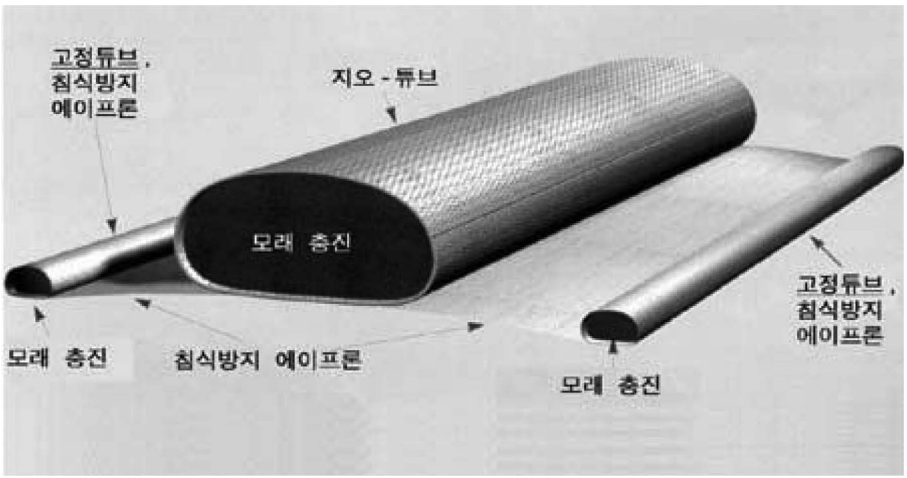

그림 1. 토목섬유 튜브 개요(임채국 등, 2007)

주변에서 사석을 쉽게 구할 수 없는 경우, 파랑의 영향을 받지 않는 내부호안 축조에는 현실적인 대안이 필요하다. 최근 한국농어촌공사는 새만금 산업단지 내 내부호안의 일종인 방수제 조성과 관련하여 방수제 표층 보호를 위한 사석대체 재료와 방수제 시공을 위한 사석대체 공법을 연구 하였으며, 사석대체 공법으로 강널말뚝과 토목섬유 튜브 공법의 적용을 검토하였다(한국지반공학회, 2009).

토목섬유 튜브공법은 튜브 형태의 토목섬유 내부에 토사를 채워 넣어 직경 1 – 5m, 길이 100 – 150m의 중력식 토류 구조물을 형성하는 것으로 가호안, 가물막이, 수중제방 등, 호안/해안 사면 축조공사에 주로 적용되었다([그림 1] 참조). 토목섬유는 폴리에스테르(PET) 또는 폴리 프로필렌(PP) 등이 주로 사용된다. 토목섬유 튜브공법은 1980년대 이후 미국, 유럽 지역에 일반화 된 공법이나 국내에는 2000년대 부산 신항만 가호안, 인천대교 연결도로 가도 축조 등에 적용된 사례가 있다. 적용되는 구간은 지상이나 수심 5 – 7m 까지 이며, 설계수명은 100년을 기준으로 한다. 토목섬유 튜브공법은 지금까지 국내에서 적용 사례가 적지만 호안 구조물 시공 사석대체 방법으로 적용성이 큰 만큼 향후 국내에서도 사용기회가 널리 확대될 것으로 기대된다.

이 글은 토목섬유 튜브를 사용하여 내부호안과 같은 구조물을 축조하는 경우 구조물의 안정성을 수치해석을 통하여 검증하려 한 사례이며, 수치해석을 통한 토목섬유 튜브 구조물 안정성 분석의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 안정성 검토 개요

2.1 한계평형 해석에 의한 안정성 검토

토목섬유 튜브 구조물의 안정성은 활동, 전도, 지지력과 같은 구조물의 외적 안정과 토목섬유의 인장강도, 내마모 특성, 장기 안정성과 같은 토목섬유 튜브 자체의 내적 안정 문제로 나누어 검토 해 볼 수 있다.

통상 토목섬유 구조물의 안정성은 외적 안정성을 의미하며, 2차원 한계평형 해석에 의한 안정성 검토가 주로 사용된다. 안정검토와 관련된 수식은 다음과 같다. 여기서, 수평저항력은 토목섬유 튜브 저면 또는 그 주변의 연약층의 전단 저항력이며 수평활동력은 쿨롱토압에 의한 배면 토체의 수평토압이다. 안정검토 결과 활동, 전도, 허용지지력에 대한 안전율을 만족시키지 못한 경우 토목섬유 튜브의 저면 길이를 증가시키거나 기초지반을 개량 하여야 한다.

2차원 한계평형 해석은 매우 단순하면서도 효과적인 안정성 검토 방법이다. 그러나, 2차원 한계평형해석에 의한 안정성 검토는 국부적인 응력집중이나 지반변형에 대한 검토, 현장의 시공 상황 반영 등이 어려운 단점이 있다.

1) 활동에 대한 안전율

$$FS_{sl} = \frac{\Sigma \text{수평저항력}}{\Sigma \text{수평활동력}} = \frac{\Sigma P_r}{\Sigma P_d} \geq 1.5 \qquad (1)$$

2) 전도에 대한 안전율

$$FS_{ot} = \frac{\Sigma \text{저항모멘트}}{\Sigma \text{전도모멘트}} = \frac{\Sigma M_r}{\Sigma M_o} \geq 2.0 \qquad (2)$$

3) 허용 지지력 검토

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{FS(2.0 \sim 2.5)} \qquad (3)$$

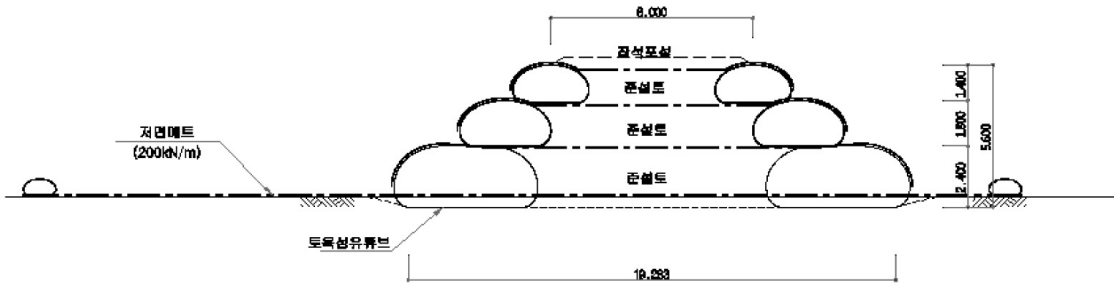

그림 2. 토목섬유 튜브 구조물 가호안

2.2 OO 호안 구조물 축조 현장 개요

가. 현장 개요

OO 현장은 해안가의 준설토 투기장 현장으로 가호안 축조후 내부 준설토 투기로 계획되었다. 현장의 수심이 3~4m로 낮아 간조시 가호안의 육상작업이 가능하였으며, 당초 사석제로 계획 되었으나 호안 축조용 사석의 구득이 어려워 가호안을 토목섬유 튜브 구조물로 대체하는 것으로 계획 하였다.

나. 지반조건

지층의 층서는 상부로부터 모래, 점토, 실트 등의 해성퇴적층과 그 하부로 풍화토, 풍화암 순으로 형성되었으며, 대체로 실트 층이 우세하다([표 1] 참조). 현장의 지층별 적용 지반정수는 [표 2]와 같다.

다. 수치해석 개요

수치해석에 의한 안정성 검토 방법은 다음과 같다.

• 단계별 구조물시공 및 뒤채움을 고려하여 시공단계별 안정해석 수행으로 지반변위, 지중응력, 토목섬유튜

표 1. 대표 시추공

공 번	해성퇴적층(m)			풍화토	풍화암	연암	보통암
	모래	점토	실트	(m)	(m)	(m)	(m)
NB-6	4.0	1.0	15.0	8.5	3.0	–	–

표 2. 지층별 적용 지반정수

구 분		단위중량(kN/m³)	점착력(c, MPa)	내부마찰각(Ø, °)	변형계수(E, MPa)	포아송비
쌓기재	배면토사	18.0	0.01	25	20	0.35
퇴적층	모래질 실트	18.5	0	26	10	0.37
	점성토	18.5	0.03	0	6	0.40
	사질토	19.0	0	28	15	0.35
풍화토		19.0	0.02	32	30	0.33
풍화암		20.0	0.03	34	140	0.30

브의 인장력과 연신율을 고려하여 안정성을 검토함

- 시공단계

  1단 튜브시공→1단 뒤채움→2단 튜브시공→2단 뒤채움→3단 튜브시공→3단 뒤채움→상부 잡석포설

- 경계조건의 영향을 배제하기 위하여 제체폭의 4배 적용
- 사용프로그램 FLAC2D ver.5.0

해석에 적용된 토목섬유 튜브의 제원은 [표 3]과 같다.

표 3. 적용 튜브제원

구 분	허용인장력 (kN)	허용연신율 (%)	튜브두께 (mm)	변형계수 (E, kPa)
PP	200	15	2.0	100,000

해석을 위한 모델링도는 다음과 같다.

3. 수치해석 결과

3.1 지반과 구조물의 변위 및 응력분포

수치해석 결과 구조물 완성 직후 단계에서 토목섬유 구조물의 연직 변위는 구조물 상부에서 25mm 발생 하였고, 구조물 하부에서는 126mm가 발생 하였다. 구조물의 수평변위는 구조물 외측 방향으로 구조물 상부에서 0.8mm 발생 하였고, 구조물 하부에서는 15mm가 발생 하였다. 전체적인 변위 경향은 구조물 중심에서 침하가 가장 많이 발생하는 경향을 나타내며, 구조물 하부에서 구조물 외측방향으로 횡변위가 발생하는 경향을 보인다([그림 4], [그림 5] 참조). 그러나 지반특성상 횡변위 보다는 연직변위가 더 크게 발생하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 [그림 6]의 변위벡터를 통해 확인 할

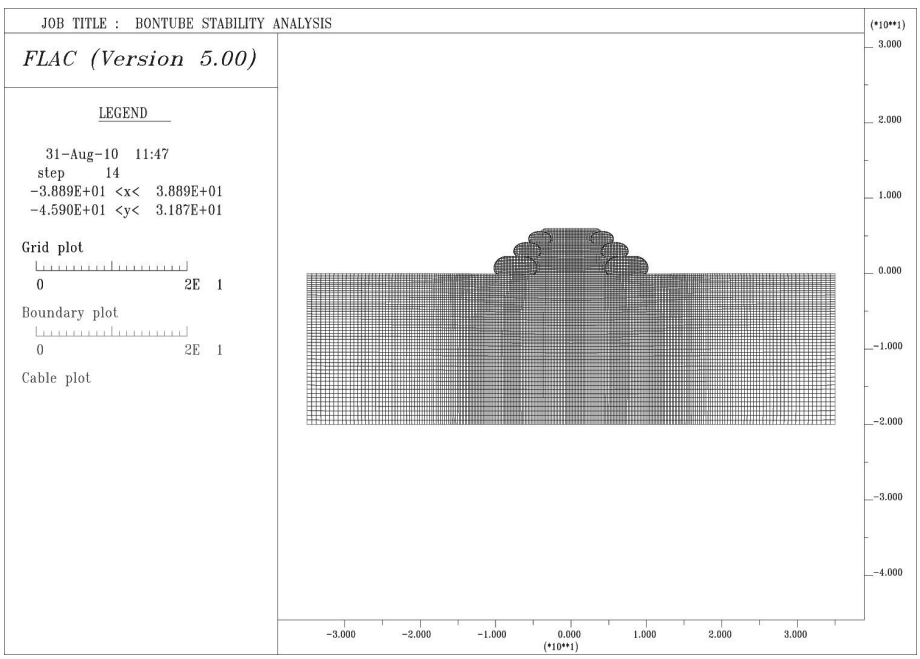

그림 3. 모델링 결과

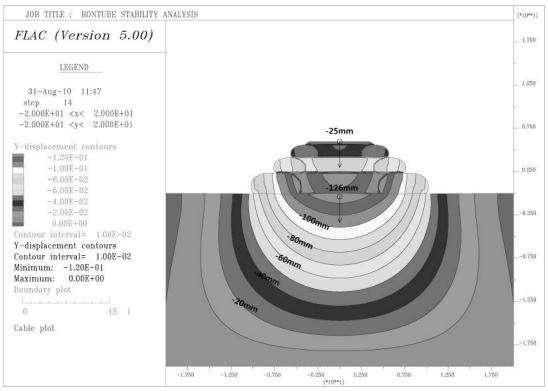

그림 4. 연직변위 결과

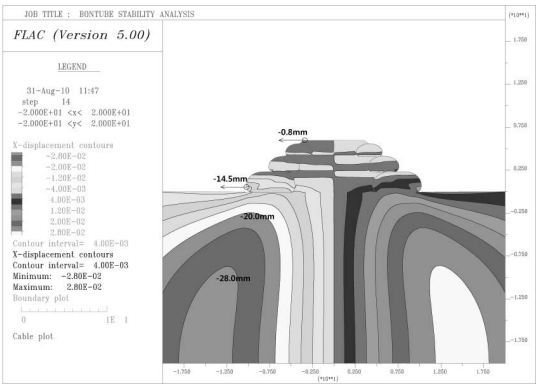

그림 5. 수평변위 결과

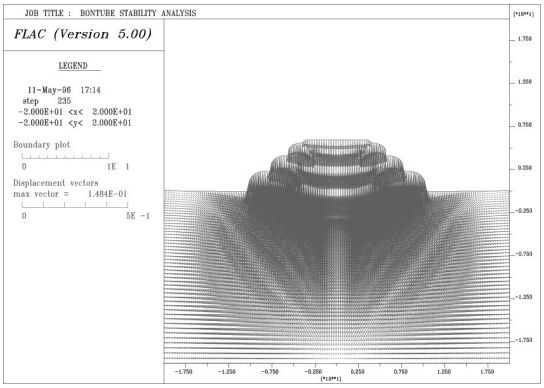

그림 6. 변위벡터

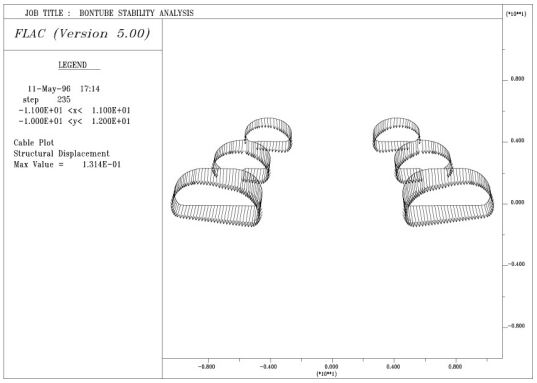

그림 7. 구조물의 변위벡터

수 있으며, [그림 7]은 구조물의 변위벡터로 구조물 만의 변위를 잘 나타내고 있다.

소성영역은 지반과 구조물의 변위 결과를 반영하여 제체 중심부 지반에서 가장 크게 나타나며, 3단의 토목섬유 튜브 구조물은 하부로 갈수록 소성영역 발생이 증가하는 것을 보여준다. 따라서 상부 구조물의 하중으로 인해 하부 구조물이 압축되어 소성영역이 발생하며, 이러한 경향은 토목섬유의 변형의 영향을 직접 받는 토목섬유 구조물 외측부 하단에 주로 집중된다. 기초지반 중측면 하단부(A)의 소성영역 발생원인은 연성지반 상에

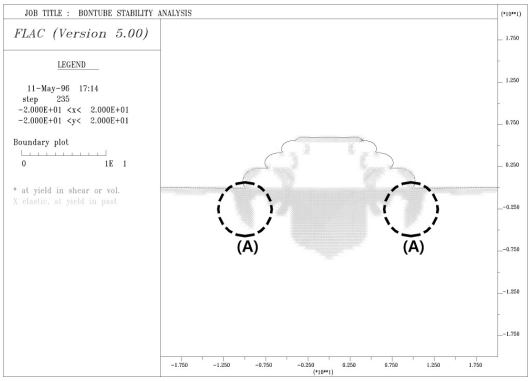

그림 8. 지반과 구조물의 소성 영역

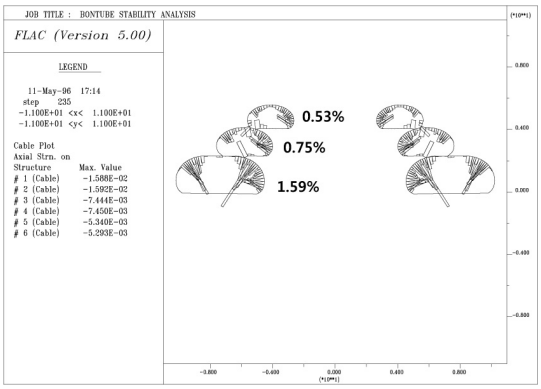

그림 9. 토목섬유 변형율

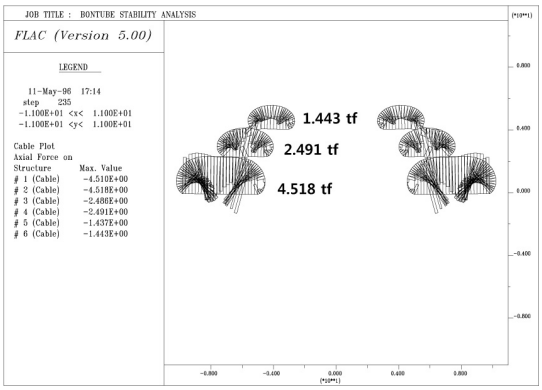

그림 10. 토목섬유 인장력

토목섬유구조물이 강성기초처럼 거동하여 나타나는 것으로 추정된다.

3.2 토목섬유의 변위와 하중

토목섬유 튜브 구조물 하단으로 갈수록 변형율이 크게 나타나며, 하단부 변형율이 약 1.6% 발생하는 것으로 해석 되었다. 이것은 토목섬유의 허용연신율(15%) 보다 작아 구조물이 안정한 것으로 보인다([그림 9] 참조). 또한 토목섬유 튜브에 작용하는 인장력은 토목섬유 튜브구조물의 제체 외부측 측면에서 가장 크게 나타나는 것으로 해석되었다. 또한 가장 하단의 토목섬유 구조물에서 가장 큰 인장력이 나타나며, 최대 인장력(4.5 tf)은 튜브재료의 허용인장력(20tonf) 이하로 나타나는 것으로 해석 되었다.

4. 결언

수치해석을 통한 토목섬유 튜브 구조물의 안정성 검토에 대한 가능성을 확인하기 위하여 OO 현장의 가호안 단면에 대한 2차원 유한차분 수치해석을 수행 하였다. 수치해석 결과 한계평형 해석으로는 파악이 어려운 지반과 구조물의 변위와 응력분포 특성과 토목섬유에 작용하는 인장력 분포 특성 등에 대한 경향을 잘 파악할 수 있었다. 따라서 수치 해석적 방법을 사용한 토목섬유 튜브의 안정검토에 대한 가능성을 확인 할 수 있었으며, 이에 대한 기술을 축적하면 향후 토목섬유를 적용한 구조물의 안정 검토에 유용하게 활용할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. 한국지반공학회, 2009, 연구보고서 소개 – 준설토를 활용한 방수제 단면축조 및 사석대체재료 개발 연구. 한국지반공학회지, Vol.24, No. 4, pp.110–112.
2. 임채국, 이종성, 송치용, 2007, "Geo-Tube를 이용한 해상가설도로 적용사례", 한국지반공학회지, .Vol.23, No.3, pp.41–53.

이달원 dwlee@cnu.ac.kr