

연약지반 위에 포설된 고화차수재의 응력-변형 특성 Stress-strain Behavior of Hardened Barrier on Soft Soil

장연수¹⁾, Yeon-Soo Jang, 이종호²⁾, Jong-Ho Lee, 임학수³⁾, Hack-Su Lim

¹⁾ 동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

²⁾ 삼보기술단 지반공학부, Junior Eninner, Dept. of Geotechnical Engineering, Sambo Engineering Co. Ltd.

³⁾ 동국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

SYNOPSIS : Settlement with crack on the hardened liners may occur in the weak clay due to waste load since the stiffness of the hardened liner is greater than that of the clay layers. Way of reducing deformation crack in the hardened liner is investigated using two computer programs, CONSOL and FLAC. The computer program CONSOL estimates the magnitude of settlement with time in clay layers and FLAC analyses the stress and deformation relationship between the foundation of landfill and waste load.

The results show that a representative block of the analyzed area reaches the consolidation settlement of 1.32m, 8.8 years after the disposal of waste started with the degree of consolidation $U=90\%$. The stress within the hardened liner exceeds the allowable vertical stress of $5\text{kg}/\text{cm}^2$ and horizontal stress of $1.67\text{kg}/\text{cm}^2$ at the concave part of the liner where the main and branch drainage pipes of leachate are located. It was recognized that the thickness of the interested area should be enlarged or the strength of the same area should be improved to tolerate the planned waste load.

Keywords : landfills, hardened barrier, leachate, waste load, stress-strain, settlement

1. 서 론

국내 폐기물 매립지는 대규모의 부지를 조성할 수 있도록 해안의 연약지반상에 시공되는 경우가 많으며 이때 연약지반 내에 침출수 집수시설의 설치를 용이하게 하고 지반의 차수효과를 증진시키기 위하여 시멘트 계열의 고화재를 바닥차수재로서 포설하는 사례가 많이 있다. 해안 연약점토의 경우 매립되는 쓰레기하중으로 원지반 침하가 발생하게 되며 포설된 고화재의 강성이 연약지반점토의 강성보다 큰 관계로 쓰레기의 하중을 대부분 고화재가 받아 고화재에 균열이 발생할 수 있는 가능성이 크다. 이에 본 연구는 응력집중에 의해 크랙이 발생시 투수계수를 최소화 할 수 있는 고화차수재를 대상으로 쓰레기가 매립됨에 따라 쓰레기 및 복토자중으로 인한 파쇄가능성이 높은 부분을 지층의 토질특성을 반영할 수 있는 침하해석 프로그램인 CONSOL과 쓰레기의 하중에 의한 지반응력-변형 특성을 고려할 수 있는 유한 차분 프로그램인 FLAC을 병용하여 침출수위에 따라 발생하는 변위와 고화층에 작용하는 응력에 대한 영향을 알아보았다.

2. 대상지반의 토질특성

대상지역의 지층구성은 지표면으로부터 해성퇴적층, 모래층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 연암층의 순으로 구성되어 있다. 퇴적층은 0.5m~1.4m의 얇은 두께로 나타나고 평균 10m의 두께를 나타내며 통일 분류상 CL과 ML의 비율이 64%대 36%이며, 점토 23%, 실트 71%, 모래 6%로 구성되어 있다. 풍화암층은 암석이 풍화된 상태에서부터 암편의 조직이 나타나는 층으로 심도는 15~30m 깊이에 분포하며, 층두께 0.8m~6.5m, 평균두께는 2.4m를 나타낸다.

그림 1과 2는 시추조사를 토대로 대상지반의 횡단분포와 종단분포를 나타낸 것으로 여러블록중 2-G 블록의 경우가 지층의 형상이 가장 불규칙하게 편재되어 있어 하중에 의한 부등침하의 영향이 클 것으로 사료되어 분석 대상블럭으로 선정하였다.

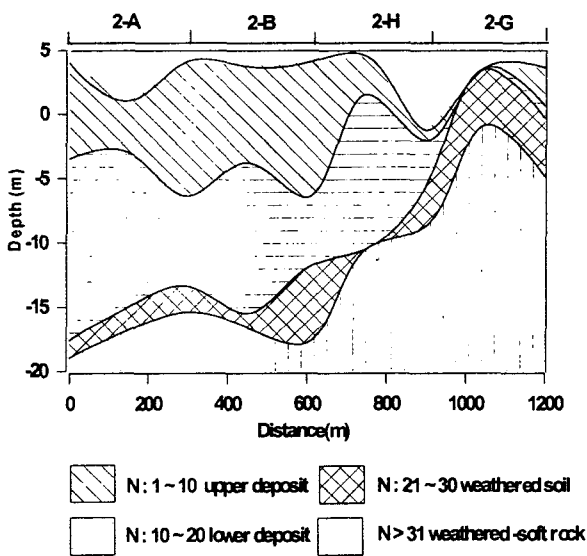


그림 1. 대상지반의 횡단 분포

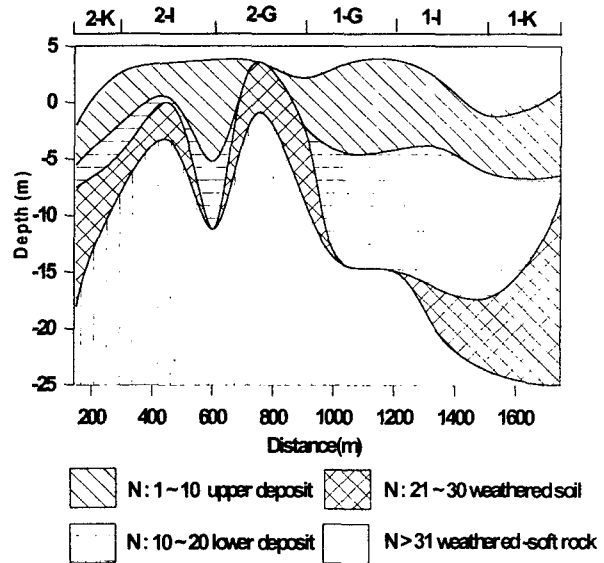


그림 2. 대상지반의 종단 분포

표 1과 2는 대상블록의 압밀침하 해석과 응력변형 해석을 수행하기 위한 입력정수로서 실내시험을 통하여 얻은 결과이며 표 2의 입력정수중 쓰레기층의 입력정수는 문헌을 참고하여 선정한 것이다.

표 1. 압밀침하해석 입력정수(장연수 외, 1999)

구분	단위중량 (t/m ³)	초기간극비 e ₀	압축지수 C _c	팽창지수 C _s	압밀계수 C _v (m ² /월)	팽창계수 C _{vs} (m ² /월)	
해성 퇴적층	상부	1.85	1.0	0.25	0.04	0.526	1.051
	하부	1.90	0.9	0.24	0.035	0.263	0.526

표 2. 응력변형 해석 입력정수(장연수 외, 1999)

구분	단위중량 (t/m ³)	점착력 (t/m ²)	전단저항각 (φ)	포아송비 (ν)	변형계수 (t/m ²)	체적탄성계수 (t/m ²)	전단탄성계수 (t/m ²)	정지토압계수 (Ko)	
상부 퇴적층	1	1.85	-	0	0.35	350	389	130	0.54
	2	1.85	-	0	0.35	450	500	167	0.54
하부퇴적층	1.90	-	0	0.30	900	750	346	0.43	
하상퇴적토	1.90	0	30	0.30	2,000	1,667	769	0.43	
풍화암+연암	2.30	10	30	0.25	190,000	126,667	76,000	0.33	
흙제방	1.85	2	25	0.30	2,000	1,667	769	0.43	
쓰레기층	1.10	0.9	26	0.30	600	500	231	0.43	

3. 압밀침하 해석

매립진행에 따른 압밀도 분석에는 1차원 Terzaghi 압밀원리를 이용한 CONSOL프로그램을 사용하여 매립이 진행됨에 따라 침출수와 쓰레기 하중에 의하여 발생하는 압밀침하량과 압밀도를 검토하였다.

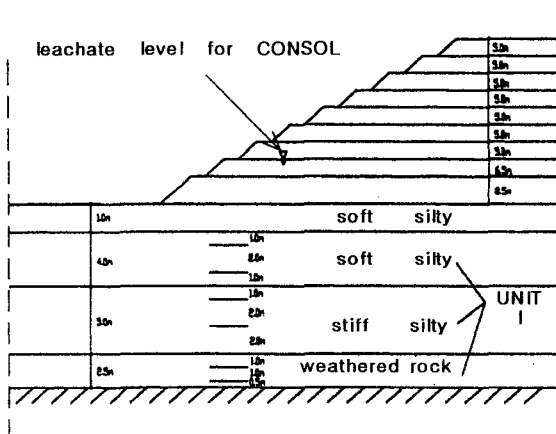


그림 3. CONSOL 해석단면

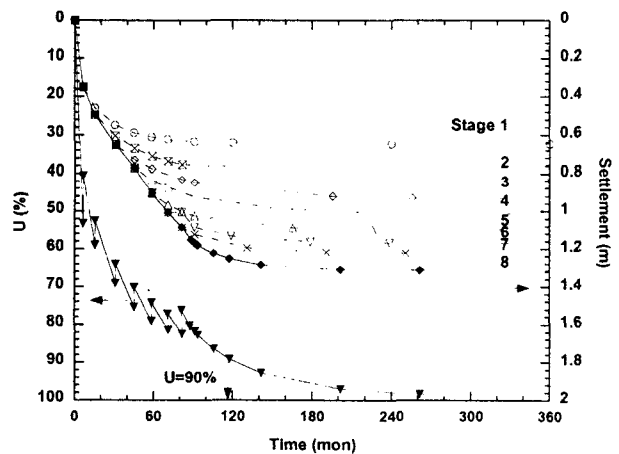


그림 4. 매립기간에 따른 압밀도와 침하량

그림 3은 블록을 모사한 것으로 침출수위는 매립2단 상부에 형성되는 것으로 보았으며 쓰레기층 각 단의 매립은 순차적으로 1단 8.5m, 2단 6.5m, 3단~8단은 8m의 높이로 매립이 진행된다.

표 3과 그림 4는 압밀침하해석 결과를 나타낸 것으로 점선으로 표시한 침하량은 각 단에서 압밀이 계속 진행되었을 때 발생할 수 있는 가상의 침하량이며 실선으로 표시된 매립 8단에서의 침하량이 실제 매립에 따른 침하량이다. 즉, 매립이 완료된 후 120개월 후 부터는 침하량에 큰 변화가 없으며 최대 침하량은 1.31m로 나타났다. 압밀도 90%에 도달하기까지 걸리는 소요기간은 106개월(8.8년)이었다.

표 3. 매립기간에 따른 침하량과 압밀도

매립 단계	단별매립고 (m)	누적수위 (m)	단별최종 침하량 (m)	누적기간 (개월)	압밀침하량 (m)	압밀도 (U(%))=S/S _{total})	
						매립직후	매립완료후
1	8.5	2.0	0.67	6.4	0.35	-	52.01
2	6.5	4.0	0.85	15.5	0.50	40.91	58.03
3	5.0	6.0	0.96	31.0	0.65	51.78	68.20
4	5.0	8.5	1.03	45.4	0.77	63.12	74.64
5	5.0	10.5	1.11	58.7	0.91	69.33	81.38
6	5.0	12.5	1.18	70.9	1.00	76.57	85.28
7	5.0	15.0	1.24	81.5	1.09	81.55	87.78
8	5.0	15.0	1.32	88.4	1.15	82.01	87.00

4. 응력-변형 해석

대상 매립지 및 고화층내의 응력-변형 해석에는 유한차분해석 프로그램인 FLAC을 사용하였는데 응력-변형 해석은 침출수위를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교 검토하였다. 고화층에 작용하는 응력은 연직응력과 수평(인장)응력으로 나누어 안정성 여부를 검토하였으며 최대 변위 발생지점의 매립단계에 따른 변화와 고화층에 응력이 가장 크게 작용하는 지점에 대한 매립단별 응력 변화를 알아보았다.

4.1 해석단면

그림 5는 대상지반 블록을 해석하기 위해 그림 1의 거리 900~1200m의 부분을 모사한 단면도로서 시추지점을 직선으로 연결하였다. 지층 구성은 표면에서부터 순차적으로 고화층, 상·하부 연약퇴적층, 풍화토층, 풍화암층의 순이며 쓰레기 층은 8단까지의 시간에 따른 순차적인 매립이고 침출수위는 매립 2단 상부에 형성된다.

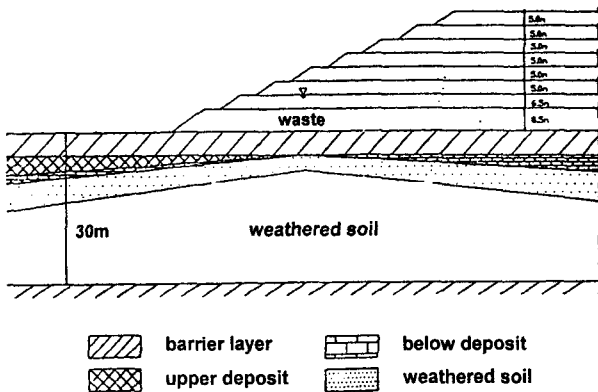


그림 5. 대상블록 응력-변형 해석 단면도

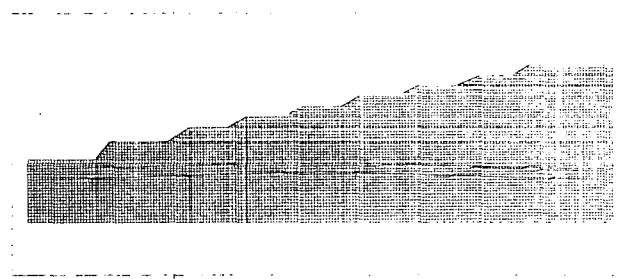


그림 6. 해석요소망

해석을 위한 요소망은 그림 6과 같이 2-G블럭 위에 매립되는 쓰레기층을 포함시켜 모사하였다. 요소망의 X축 방향은 블럭의 좌·우측 300m, Y축방향은 매립 8단에서 풍화암 저면까지 80m이며 11,000개의 절점과 11,256개의 요소로 구성되어 있으며 경계조건은 양쪽 끝단에서는 X방향 구속, Y방향 hinge로 하였고, 바닥부에는 X, Y방향 모두 구속하였다.

4.2 해석결과

4.2.1 연직변위량

대상 매립지의 변위량은 각 단별 매립시에 고화층내의 최대변위지점과 2-G블럭의 최대변위지점을 검토하여 표 4에 나타내었다.

표 4 매립단별 대상지반의 최대변위량 및 최대 변위 지점 비교

매립단계	침출수위 무고려	침출수위고려	최대변위 발생지점
	최대 침하량(cm)	최대 침하량(cm)	
1	18.7	18.7	사면부분
2	35.0	35.4	1단과 2단의 경계부
3	43.0	52.4	2단과 동일
4	52.4	76.8	2단과 3단의 경계부분
5	76.8	100.9	4단과 동일
6	101.0	125.0	2단, 3단, 4단의 경계부분
7	156.0	156.1	6단과 동일, 사면부로 확대이동
8	191.2	194.8	7단과 유사

쓰레기가 1~7단 매립시 연직변위는 침출수위를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우가 변위량에서 다소 차이가 있으나 최대변위 지점, 경계부분 등의 연직변위 분포는 유사하게 나타났다.

그림 7은 침출수위를 고려하지 않은 경우 매립 단별 고화층 내에서의 위치별 연직변위 변화를 나타낸 것인데 쓰레기 매립이 각 단별로 순차적으로 진행됨에 따라 고화층의 변위도 증가함을 알 수 있다. 매립 1단에서는 고화층의 평균 침하량이 약 5cm정도로 나타났다. 가장 고화층의 변위가 크게 발생한 곳은 200m 지점으로 쓰레기가 8단까지 매립되는 우측부이며 최대 변위량은 34.1cm로 나타났다. 침출수위를 고려한 경우도 값의 차이는 조금 있으나 변위 경향은 유사하였다.

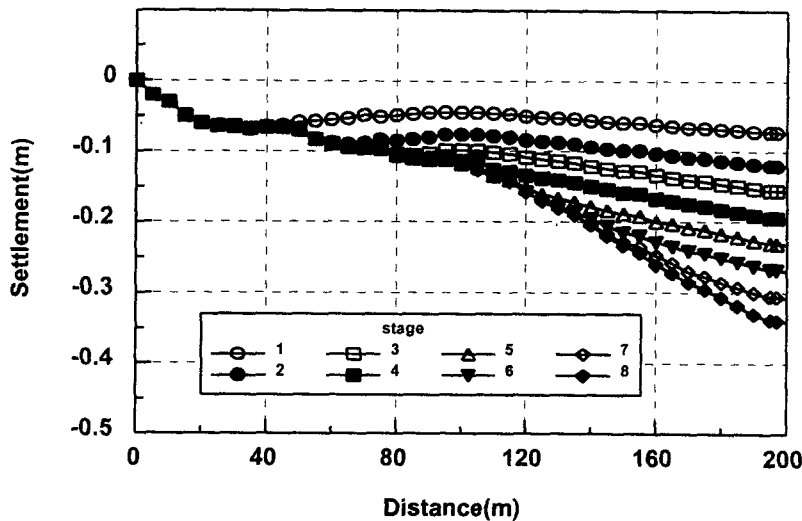


그림 7. 침출수위를 무고려시 매립단별 연직변위

그림 8은 매립이 종료된 후 2-G블럭 고화층의 연직변위를 침출수위를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 나타낸 것이다. 두 경우 모두 변화 양상이 유사하며 가장 큰 변위량을 보이는 지점은 두 경우 모두 동일하고(200m 지점) 침출수위의 상승시 최대변위는 36.5cm로서 침출수위를 고려하지 않은 경우 34.1cm보다 고화층에서 약 2.4cm의 큰 변위가 발생하였다.

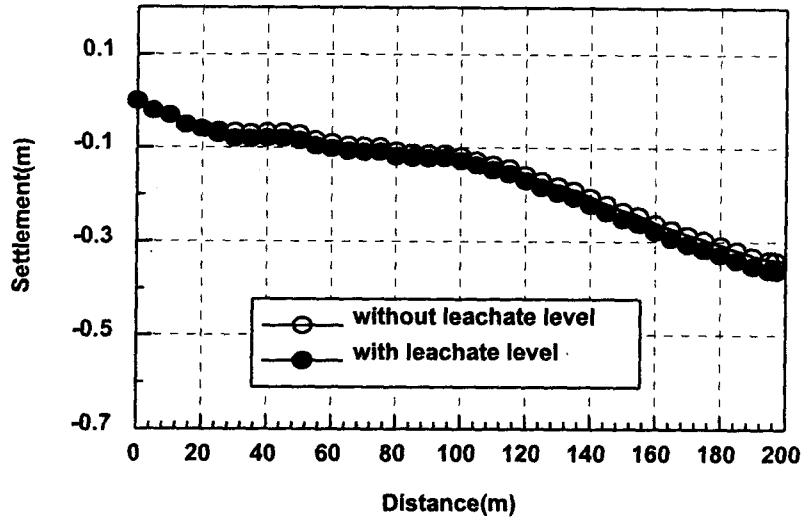


그림 8 침출수위 유·무로 인한 고화층 연직변위

이상과 같이 침출수위를 고려한 해석과 고려하지 않은 해석에서 고화층의 변위차가 적은 것은 폐기물의 단위중량이 1.1tonf/m'이고 침출수의 단위중량이 1.0tonf/m'로서 큰 차이를 보이지 않기 때문으로 사료된다.

4.2.2 고화층에 작용하는 응력

대상 블록의 응력상태 분포는 연직응력이 고화층의 소요강도인 5kgf/cm'의 허용 여부를 검토하였으며 문헌을 통하여 인장응력에 대한 파쇄 가능성을 검토하였다.

그림 9는 8단까지 매립완료시 침출수위를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 고화층에 작용하는 연직응력을 2-G블럭을 대상으로 검토한 결과로 매립 8단까지 포함하고 있는 부분인 거리 260m부터는 최대응력에 도달하고 있으나 고화층의 허용응력인 5kgf/cm'를 초과하지 않았다. 거리 0~50m 구간에서 연직응력의 변화는 매립 1단과 2단의 이격구간(중첩 제외구간)의 영향으로 사료된다. 침출수위를 고려한 경우와 침출수위를 고려하지 않은 경우는 변위와는 다르게 차이를 보이지 않았다.

폐기물 관리법에는 인장강도의 조항은 없으나 고화층의 균열 발생여부를 검토하기 위하여 쓰레기 매립과 누적침출수위로 인하여 발생하는 인장응력을 검토하였다. Mitchell(1981)은 다짐 개량된 지반의 일반적인 압축강도와 인장강도 및 특성에 관하여 압축강도는 첨가된 시멘트 및 혼화재에 의해 좌우되며 휨강도 및 인장강도는 압축강도의 1/5~1/3정도의 소요강도를 가진다고 발표하였다. 이 결과를 적용하면 본 대상지반의 압축강도가 5kgf/cm'이므로 허용 인장강도는 1~1.67kgf/cm'가 되며 이를 기준하여 침출수위를 고려하지 않은 경우와 침출수위를 고려하는 두 경우의 각 단 매립완료후 수평응력을 거리별로 나타낸 것이 그림 10이다.

침출수위를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 모두 매립이 진행됨에 따라 수평응력도 점점 증가하는 경향을 나타내었으며 두 경우 모두 매립 4단부터 Mitchell의 인장강도 균열 발생가능 범위에 포함되었다. 침출수위를 고려하지 않은 경우는 매립 8단에서, 침출수위를 고려한 경우는 매립 7, 8단에서

Mitchell의 인장강도 균열 발생가능 범위를 초과하고 있다. 즉, 고화층이 압축강도에서는 안정하나 인장강도에 대해서는 단이 높아지면서 균열 및 파괴의 가능성이 있는 것으로 보여진다. 또한 침출수위의 형성에 의한 고화층에 작용하는 응력은 연직응력보다는 인장응력이 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

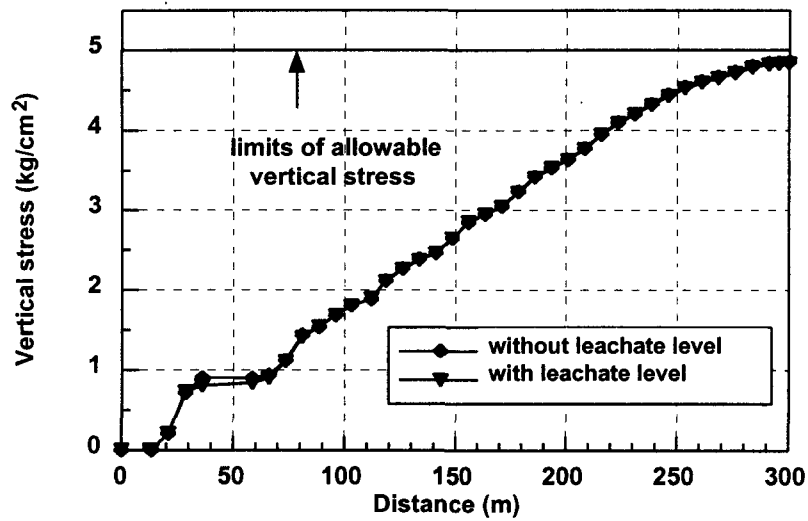


그림 9. 매립완료시 침출수위에 따른 고화층의 연직응력

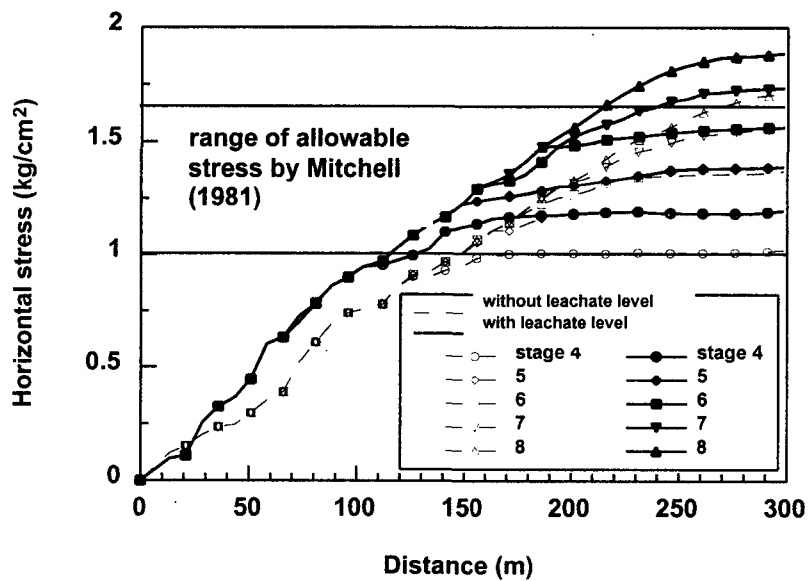


그림 10 침출수위 유·무에 의한 매립단별 고화층의 인장응력

5. 결론

쓰레기 매립하중과 누적수위로 인한 원지반의 침하현상을 압밀해석용 프로그램 CONSOL을 이용하여 규명하고 이에 따른 고화층의 과다응력 및 변형 발생 지점을 응력-변형해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 규명한 결과 압밀침하 해석시 압밀침하량은 1.32m, 압밀도 90%에 도달하는 소요기간은 8.8년으로 나타났다.

침출수위를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대하여 검토한 결과 연직변위, 연직, 수평응력 모두 유사한 경향을 나타내었으며 이는 폐기물과 물의 단위중량의 차이가 거의 없기 때문으로 사료된다.

고화층에 발생한 최대 연직응력은 허용응력 5kgf/cm^2 이하로, 수평응력은 두 경우 모두 Mitchell(1981)이 제안한 인장강도범위(압축강도의 $1/5 \sim 1/3$)인 $1 \sim 1.67\text{kgf/cm}^2$ 에 매립 4단에서부터 도달하여 균열발생 가능성을 보여주었고 7~8단 매립시에는 이를 초과하여 균열발생의 가능성이 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 성정 산업의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 장연수, 이종호, 문준석, 류진현, 임학수(1999), 연약지반위에 시공된 SSSH 차수재의 내구성과 고화재의 변형 특성에 관한 연구, 동국대학교.
2. 한국지반공학회(1994), 폐기물 매립시설 세부설치기준 요약보고서.
3. Cundall, P.A.(1995), *A Manual of Fast Lagrangian Analysis of Continua* Ver 3.3, Itasca Consulting Group Inc.
4. Mitchell, J.K.(1981), "Soil Improvement-State of the Art Report" in *proceeding of the tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm*, vol. 4, No. 12, pp. 509-558.
5. Wong, K.S. and Duncan, J.M.(1984), *Manual of CONSOL*, University of California, Berkely.