

유한요소해석을 통한 계단식 보강토 옹벽의 거동특성

Investigation on Behavior of Two-Level Soil-Reinforced Segmental Retaining Walls Using Finite Element Analysis

유충식¹⁾, Chung-Sik Yoo, 전영우²⁾, Young-Woo Jeon

¹⁾ 성균관대학교 토목공학과 교수, Assoc Professor. Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student. Dept. of Civil Engrg., Sungkunkwan Univ.

SYNOPSIS : The behavior of two-level soil-reinforced segmental retaining wall was examined using the finite element analysis. A number of different case was analyzed by varying the reinforcement length and the offset distance between the upper and lower wall. The results indicate that the interaction between the upper and lower walls can be neglected the upper wall is located beyond the distance of the lower wall height. A so found is that for moderate offset distances, the interaction between the two walls generally is limited to the external stability of the wall. Implication of the findings are discussed

Key Words : finite element analysis, reinforced earth, two-level segmental retaining wall, geogrid

1. 서 론

1990년도 중반 이후 국내에서도 보강토 옹벽의 시공 사례가 증가 하고 있고 최근 옹벽의 장대화에 따라 구조적 안정성, 시각적 안정성의 이유로 계단식으로 시공되는 옹벽이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 계단식옹벽은 상·하단 옹벽의 상호영향에 의한 복잡한 메카니즘을 가지고 있다는 연구결과가 보고 되고 있고 실제로 계단식옹벽의 시공 중, 시공 후에 많은 크고 작은 문제들이 보고 되고 있다. 국내의 많은 시공사례에서도 옹벽의 외적 안정성을 좌우하는 중요한 설계인자인 보강재의 포설길이가 FHWA(Federal Highway Administration)나 NCMA(National Concrete Masonry Association)에서 제시 하는 기준에 합당하지 못한 경우가 많은 등 계단식 보강토 옹벽의 역학적 거동에 관한 이해가 부족한 실정이다. 또한 기존의 설계법들 조차도 아직 단일화된 합당한 기준을 제시하고 있지 못하고 있고 또한 다분히 보수적인 경향을 띄고 있다. 때문에 많은 연구를 통해 계단식 보강토 옹벽의 역학적 거동을 이해하고 이를 통한 합리적이고 단일화된 설계기준의 확립이 시급하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 계단식 보강토 옹벽의 상단옹벽 수평 이격거리에 따른 상·하단 옹벽의 상호 거동을 고찰 하였다. 즉, 유한요소해석을 통해 계단식 보강토 옹벽의 외적 안정성 확보의 중요인자인 하단옹벽 보강재 포설길이에 따른 영향을 평가하려는 시도를 하였고, 현 설계법에서 제시하는 보강재 포설길이 적용한 옹벽의 상단옹벽 이격거리에 따른 전반적인 거동을 검토하여 계단식 보강토 옹벽에 관한 기존 설계기준과 비교, 분석을 통한 타당성을 검토하였다.

3. 유한요소 해석

3.1 해석조건

그림 1은 유한요소 해석을 위해 적용한 계단식 보강토 옹벽을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 것과 같이 6m의 하단옹벽과 4m의 상단옹벽으로 서로 다른 상단옹벽 이격거리($d_h = 0.2H_1, 0.4H_1, 0.6H_1, 1.0H_1, 1.5H_1$)를 갖는 계단식 보강토 옹벽으로써 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며 보강토 옹벽과 같은 토류구조물의 해석 시 필수적인 시공과정 모델링을 통하여 상·하단옹벽의 거동 특성을 분석하기 위한 해석을 수행하였다.

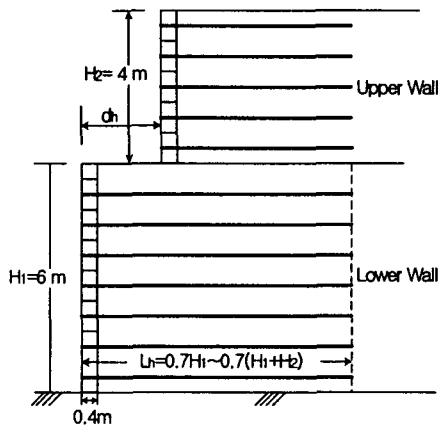


그림 1. 해석에 적용된 계단식 옹벽

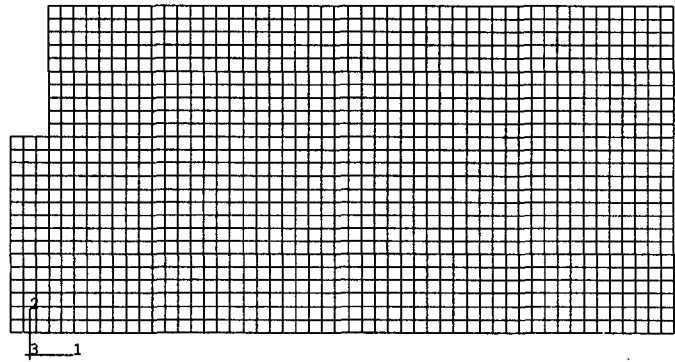


그림 2. 해석에 적용된 유한요소망

3.2 해석 모델링

계단식 보강토 옹벽에서 서로 다른 상단옹벽 이격거리를 갖는 옹벽과 각 이격거리에 대해 서로 다른 보강재 길이를 갖는 옹벽에 대한 모델링을 하였다. 그림 2는 해석에 적용된 유한요소망을 보여주고 있다. 옹벽은 견고한 지반에 시공되는 경우로 가정하여 기초지반에 대한 영역은 모델링에서 제외시켰으며 경계조건은 옹벽의 전면부를 제외한 수직경계면은 x방향으로 구속하였다. 블록과 뒷채움 흙은 8절점 사각요소를 사용하였고 보강재는 3절점 사각트러스요소를 사용하였다. 보다 정확한 해석을 수행하기 위해 블록과 뒷채움 사이에 interface 요소를 사용하여 벽체와 뒷채움 흙 간의 상호작용을 모델링 하였고 마찬가지로 기초지반과 뒷채움 흙, 기초지반과 블록 사이에도 interface요소를 사용하여 상호작용을 모델링 하였다. 보강재의 전단 또는 인발 파괴는 보강재 주변의 흙을 따라 발생한다는 연구결과(Zornberg & Mitchell 1994, Karpurapu & Bathurst 1995, Rowe & Ho 1997) 를 근거로 하여 보강재와 뒷채움 흙에는 interface요소를 사용하지 않았다. 표 1은 해석에 적용한 정수들을 나타내고 있다. 해석에 적용한 정수들의 값은 일반적인 값을 사용하였다.

표 1. 해석에 적용된 정수

	E (kN/m ²)	v	v(kN/m ²)	c(kN/m ²)	Φ(deg)	Ψ(deg)	cohesion yield stress(kN/m ²)	friction coeff
뒷채움 흙	20000	0.3	18	0	30	6	1.0	-
블럭	1000000	0.3	18	-	-	-	-	-
보강재	1.0×10^8	0.3	0.001	-	-	-	-	-
interface1	-	-	-	-	-	-	-	0.35
interface2	-	-	-	-	-	-	-	0.47

5. 보강재 길이의 영향

5.1 수평변위

그림 3과 그림 4는 계단식 보강토 옹벽의 하단옹벽 보강재 길이(L_h)를 증가시키며($0.7H_1 \sim 0.7(H_1+H_2)$) 적용한 경우 옹벽의 벽체, 보강토체 배면 그리고 보강토체 내부에 발생하는 수평변위를 나타내고 있다. 보강토 옹벽에서 벽체의 수평변위는 보강토체의 배면에 작용하는 수평 토압에 의한 변위와 보강토체 내부의 변위에 의해서 유발된다는 개념으로부터 보강토체 내부의 변위는 벽체에 발생하는 수평변위에서 보강토체 배면에 발생하는 수평변위를 감하여 얻을 수 있다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 상단옹벽 이격거리 $0.2H_1$ 의 경우 옹벽의 수평변위는 보강재 길이가 증가함에 따라 벽체의 수평변위가 감소하지만 감소 폭이 매우 작다. 그러나 그림 4의 상단옹벽 이격거리 $0.6H_1$ 의 경우 보강재 길이를 증가시킬수록 하단옹벽의 벽체 변위는 현저히 감소하며 약 $5.6m(L_h=0.9H_1)$ 에서 변위의 감소가 둔화되는 경향을 보인다. 또한 보강재의 변화에 따른 이러한 거동에서 주시해야 할 부분은 보강토체 배면의 변위인데 벽체의 수평변위 감소의 대부분이 보강토체 배면의 감소에 의한 것임을 알 수 있는데 이는 보강재 길이가 옹벽의 외적 안정성 평가에 주요설계인자로 고려되고 있는 현 설계법의 타당성을 뒷받침한다고 할 수 있다.

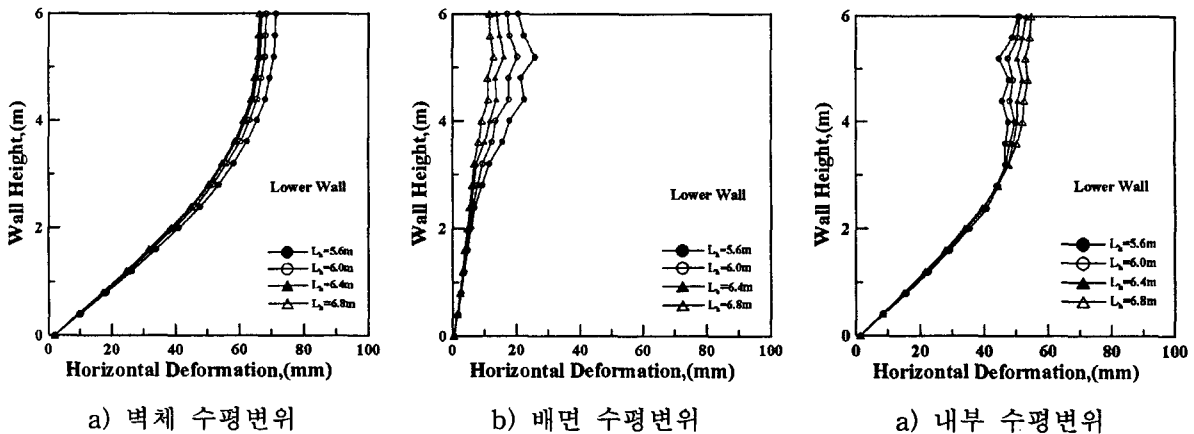
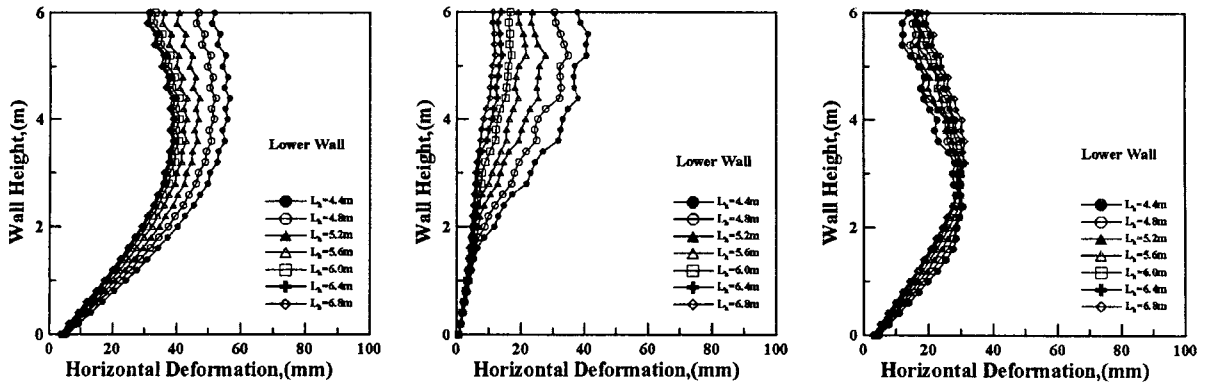


그림 3. 이격거리 $0.2H_1$ (하단옹벽)



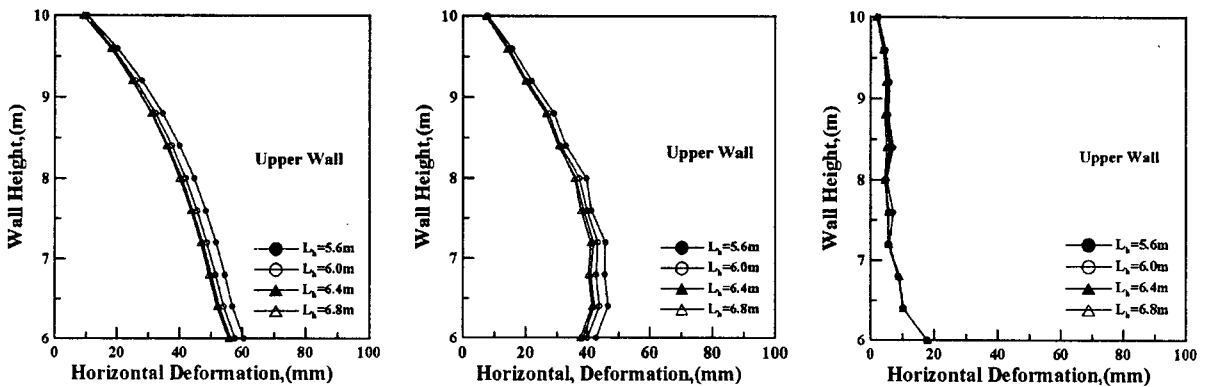
a) 벽체 수평변위

b) 배면 수평변위

c) 내부 변위

그림 4. 이격거리 $0.6H_1$ (하단옹벽)

그림 5와 그림 6은 하단옹벽의 보강재 길이를 변화시킴에 따른 상단옹벽의 수평변위를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 상단옹벽의 수평변위의 감소 폭은 매우 작고 또한 보강토체 내부의 수평변위의 경우 거의 변화가 없다. 즉, 상단옹벽은 하단옹벽의 보강재 길이에 직접적으로 영향을 받지 않는다. 상단옹벽의 수평변위는 상단옹벽의 기초부분인 하단옹벽의 상부의 변위로 수반되는 영향이라고 생각할 수 있다. 이와 같은 경향은 상단옹벽의 벽체변위와 하단부의 내부변위로써 확인할 수 있다. 다음에 설명할 보강재 최대 유발인장력에서 다시 확인할 수 있을 것이다.

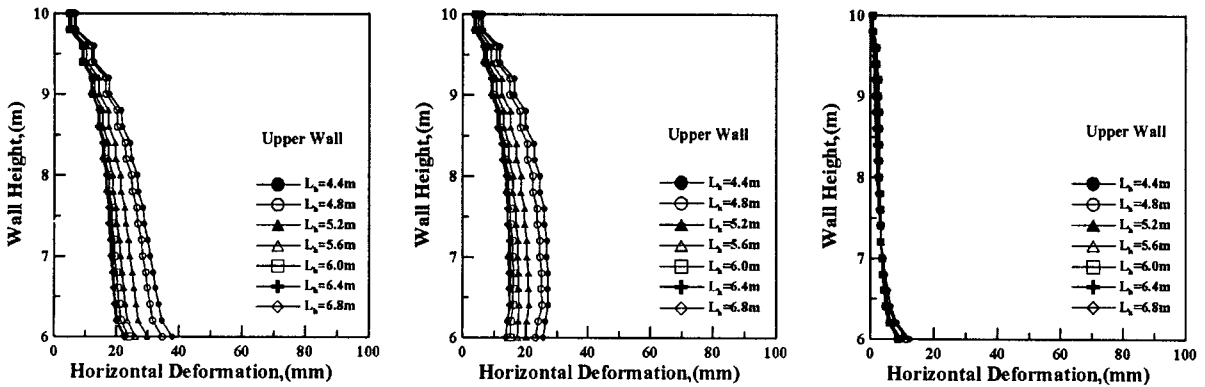


a) 벽체 수평변위

b) 배면 수평변위

c) 내부 수평변위

그림 5. 이격거리 $0.2H_1$ (상단옹벽)



a) 벽체 수평변위

b) 배면 수평변위

c) 내부 수평변위

그림 6. 이격거리 $0.6H_1$ (상단옹벽)

5.2 보강재 유발인장력

본 절에서는 보강토 옹벽의 내적 안정성 평가에 중요한 항목 중의 하나인 보강재 유발인장력에 대해 검토하였다. 그림 7은 계단식 보강토 옹벽의 하단옹벽 보강재 포설길이에 따른 보강재 최대 유발인장력 분포를 각각의 상단옹벽 이격거리를 갖는 경우와 FHWA, NCMA설계기준에 의한 보강재 유발인장력 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보이듯이 상단옹벽 수평이격거리가 증가할수록 보강재에 유발되는 인장력은 감소하는 경향을 보인다. 즉, 상단옹벽의 하단옹벽에 대한 영향이 상대적으로 적어질수록 보강재 유발인장력은 감소한다고 말할 수 있다. 또 기존의 설계법에서 제시하는 기준에 따라 이격거리가 상대적으로 작아 높이 H_1+H_2 로 가정할 수 있는 $0.2H_1$ 의 경우와 이격거리가 상당히 멀어 상단옹벽의 영향이 없어 높이 H_1 로 가정할 수 있는 $1.0H_1$ 의 경우 보강재 길이에 의한 유발인장력의 변화는 무시할 수 있을 정도로 매우 작게 나타나고 있다. 반면 상단옹벽에 의한 영향뿐 아니라 상·하단옹벽의 상호작용을 무시할 수 없는 $0.4H_1$ 과 $0.6H_1$ 의 경우 하단부 보강재에서의 최대 유발인장력의 증가가 뚜렷하고 보강재 길이가 증가함에 따라 최대 유발인장력 또한 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 복잡한 보강토 옹벽의 상호 거동 메카니즘을 단적으로 보여준다. FHWA와 NCMA설계법에 의해 계산된 보강재 유발인장력을 살펴보면 NCMA의 경우 이격거리 $0.2H_1$ 에 대해서는 유한요소해석 결과에 비해 모두 지나치게 과대평가되었고 그 외의 이격거리에 대한 옹벽의 경우 하단부에서는 두 설계법 모두 해석결과에 비해 지나친 과대평가를 하고 있고 상단부에서는 해석결과와 유사한 값으로 산정되거나 $1.0H_1$ 의 경우 해석결과에 미치지 못하는 값으로 산정되었다. 이는 내적 안정성에 있어 중요한 설계인자 중 하나인 보강재 유발 인장력을 보수적인 설계법에 의한 평가에서도 안전측에 있음을 확신할 수 없다는 것을 의미한다.

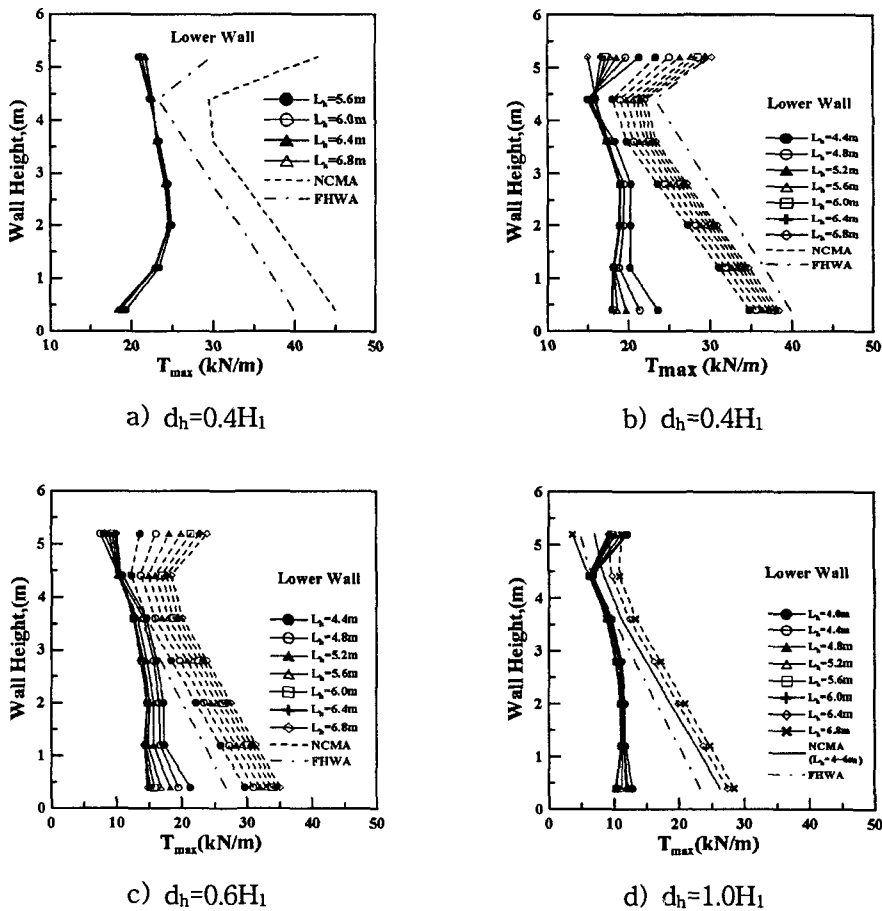


그림 7. 하단옹벽 보강재길이에 따른 최대 보강재 유발력

5.3 보강재 임계길이

그림 8은 보강재 길이에 따른 벽체의 최대 수평변위의 영향을 서로 다른 상단옹벽 이격거리를 갖는 옹벽에 대해 분석한 내용을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 상단옹벽 이격거리 $0.2H_1$, $1.0H_1$, $1.5H_1$ 의 경우 보강재 길이를 증가시켜도 변위의 감소는 매우 작게 발생하고 $0.4H_1$, $0.6H_1$ 의 경우 보강재 길이가 증가할수록 변위의 감소는 현저하며 보강재 길이가 약 $5.8m(L_h=1.0H_1)$ 에서 수렴하는 경향을 보인다. 이것은 앞서 설명한 상단옹벽 이격거리에 따른 보강재 유발인장력의 분포와 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 이러한 변위의 감소경향은 주어진 조건에 대해 임계 보강재 길이가 존재한다는 것을 의미한다. 때문에 계단식 보강토 옹벽의 설계 시 벽체의 변위를 감소시키기 위해서는 보강재 길이를 고려해야 한다. 동시에 경제성 및 보강재 포설 충수, 보강재 강성 등의 종합적 검토가 수행되어야 할 것이다.

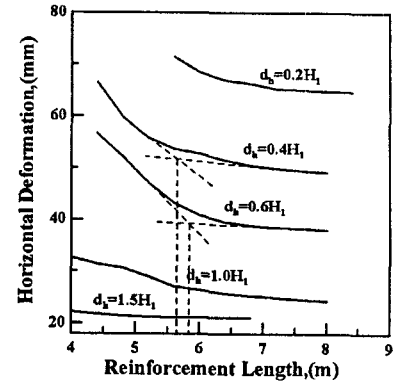


그림 8. 보강재 길이에 대한 최대 벽체 변위

6. 이격거리에 대한 영향

6.1 수평변위

이번 절에서는 일정한 하단옹벽 보강재 포설 길이를 갖는 계단식 보강토 옹벽에서 상단옹벽 수평이격 거리에 따른 상·하단옹벽의 수평변위 경향을 검토하였다. 그림 9와 그림 10은 $0.7(H_1+H_2)$ 의 하단옹벽 보강재 포설길이를 갖는 계단식 옹벽에서 상단옹벽 수평 이격거리를 증가시켰을 경우($0.2H_1 \sim 1.5H_1$) 하단옹벽에 발생하는 수평변위를 나타내고 있다. 그림에서 보이듯이 상단옹벽 이격거리가 증가할수록 벽체의 변위는 현저히 감소한다. 반면 보강토체 배면에서의 수평변위는 이격거리에 상관없이 거의 일정한 것을 볼 수 있는데 이것은 상단옹벽 이격거리의 증가에 따른 벽체의 수평변위는 전적으로 보강토체 내부 변위에 기인한다고 생각할 수 있고 그림 9 (c)의 내부변위에서 확인할 수 있다. 그림 10의 상단옹벽의 경우 하단옹벽의 거동과는 매우 상이한 결과를 보이고 있다. 벽체의 수평변위는 하단옹벽과 마찬가지로 이격거리가 증가할수록 큰 폭으로 감소하지만 벽체의 변위는 하단옹벽과는 달리 대부분의 변위가 보강토체 배면 변위에 기인하는 반면, 내부 변위는 거의 일정한 변위를 나타낸다. 상단옹벽의 이러한 거동은 앞에서도 설명한 바와 같이 전적으로 하단옹벽의 변위에 따른 영향으로 생각할 수 있다.

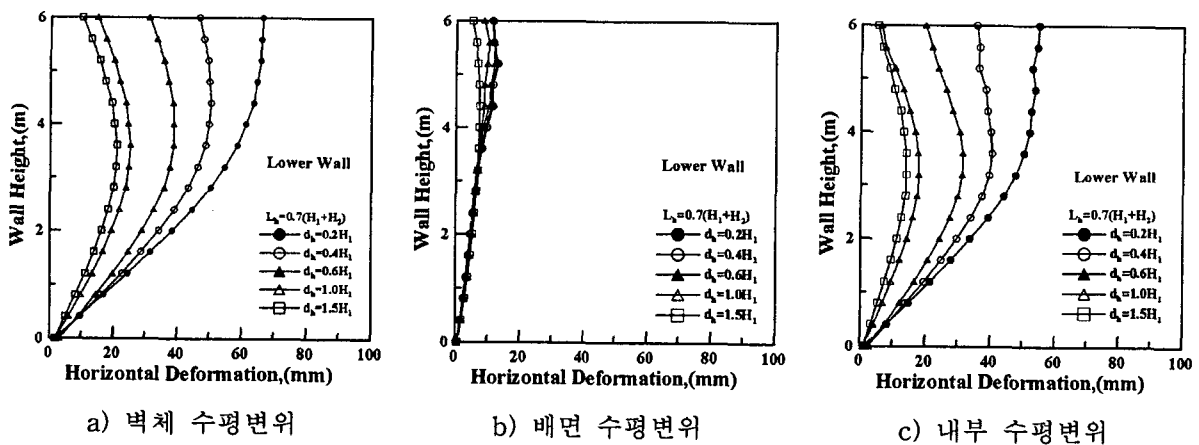


그림 9. 상단옹벽 이격거리에 따른 수평변위 (하단옹벽)

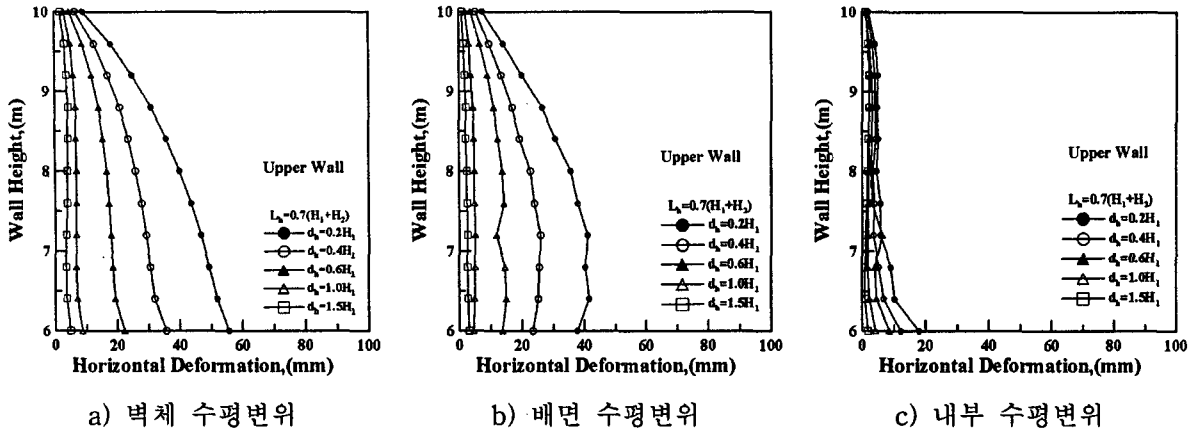


그림 10. 상단옹벽 이격거리에 따른 수평변위 (상단옹벽)

6.2 보강재 유발 인장력

그림 11은 보강재 포설길이를 $0.7(H_1+H_2)$ 로 고정시키고 이격거리를 증가시켰을 경우 하단옹벽의 보강재에 발생하는 유발 인장력을 나타내고 있다. 그림에서 보이듯이 상단옹벽 수평 이격거리가 증가할수록 보강재에 유발되는 인장력은 현저히 감소한다. 이는 옹벽의 수평변위 양상과도 잘 일치한다. 또한 주의해야 할 부분은 이격거리가 상당히 큰 $1.0H_1$ 과 $1.5H_1$ 의 경우 유발 인장력이 거의 일치하는데, 이것은 $1.0H_1$ 이상의 이격거리에서는 상단옹벽이 하단옹벽에 영향을 미치는 범위를 벗어난 것으로 간주할 수 있고 이러한 경향은 앞서 설명한 보강토체 내부 수평변위와 같이 이해할 수 있을 것이다.

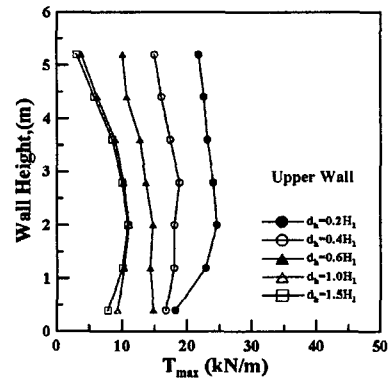


그림 11. 최대 보강재 유발력

7. 결론

본 연구에서는 계단식 보강토 옹벽의 전반적인 거동 특성 즉, 벽체의 수평거동, 보강재 유발인장력, 보강재 길이가 거동에 미치는 영향, 이격거리에 의한 영향 등을 유한요소 해석을 이용하여 분석하였다. 해석 결과에 의하면 상·하단 옹벽의 이격거리가 크지 않은 경우 하단 옹벽의 보강재 길이가 하단옹벽 높이의 0.7배 이상에서는 길이에 따른 차이가 거의 없는 것으로 나타나며, 이격거리가 큰 경우에는 하단 옹벽에 포설되는 보강재의 길이가 전반적인 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 이격거리가 하단옹벽의 높이 이상에서는 하단옹벽이 상단옹벽에 그다지 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타나 각각의 옹벽은 단일 옹벽으로 간주하여도 무방할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 기존의 설계법들의 타당성에 대한 재검토가 필요함을 의미하고 아울러 계단식 보강토 옹벽의 역학적 거동을 보다 명확히 이해하고 그에 따른 합당한 설계법의 제시가 필요하다고 할 수 있겠다. 또한 이러한 이해를 바탕으로 현재 시공사태가 증가하고 있는 계단식 보강토 옹벽의 적용에 대해서도 그 타당성에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Yoo.C.S (2002). "Behavior of Soil-Retaining Walls in Tiered Arrangement" Journal of the KGS, Vol. 18, No.3. June 2002, pp61-72
2. Yoo.C.S (2002). "Review of Current Design Practice for Soil-Reinforced Segmental Retaining Walls" Proceedings of The KGS Spring Con. pp541-548
3. Bathurst, R. J.(1992), Case study of a monitored propped pannel wall, Proc. 5th Int. Symp. on Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls, Balkema, Rotterndam, Brookfield, 159~166.
4. NCMA, 1997. Design Manual for Segmental Retaining Walls, 2nd Ed., MCMA, Virginia.
5. FHWA, 1997. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design and Construction Guidelines, *FHWA Demonstration Project 82*, FHWA, Washington, DC, FHWA-SA-96-071
6. Rowe, R.K. & Ho, S.K. 1997. Continuous Panel Reinforced Soil Walls on Rigid Foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 10, pp. 912-920.
7. Kapurapu, R. & Bathurst, R.J. 1995. Behavior of Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls Using the Finite Element Analysis, *Computers and Geotechnics*, Vol. 17, pp. 179-299.
8. ABAQUS (ver. 5.8) 1999. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.