

상재하중이 블록식 보강토 옹벽의 거동에 미치는 영향

Effects of Surface Loading on the Behavior of Soil-Reinforced Segmental Retaining Walls

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 김주석²⁾, Joo-Suk Kim

¹⁾ 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

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

SYNOPSIS : This paper presents the results of investigation on the effects of surface loading on the performance of soil-reinforced segmental retaining walls using the finite element method of analysis. A parametric study was performed by varying location of surface loading. The results of the analyses indicate that the increment of the reinforcement tensile load due to the presence of surface load may be significantly over-estimated when using the conventional approach. Furthermore, the external stability should be carefully examined when a surface loading is present just outside the reinforced soil zone. The implications of the findings from this study to current design approaches are discussed in detail.

Key words : surface loading, soil-reinforced segmental retaining walls, finite element method

1. 서론

보강토 공법은 1996년 Henry Vidal에 의해 소개된 이래로 급속히 확산되었으며, 국내에서는 1990년도 후반에 사용이 빈번하게 되었다. 블록식 보강토 옹벽에 관한 현 설계법이 극히 보수적임에도 불구하고 구조물의 시공중이나 시공후, 국부 및 전체 파괴에 걸쳐 크고 작은 문제점들이 발생하고 있으며, 여전히 이론과 실제 시공과의 격차를 줄이기 위해 많은 연구가 수행되어지고 있다.

블록식 보강토 옹벽의 거동은 벽체, 보강재, 뒤채움재 간의 내부 상호작용에 의해 지대한 영향을 받으며(Karpurapu & Bathurst, 1995), 이러한 상호작용의 정도는 각 구성요소의 물성치에 따라 다양하게 변화된다. 최근 들어 보강토 옹벽에 관한 축소 및 실험실 실험 (Juran & Christopher, 1989; Bathurst, 1990), 현장 실험 (Simac et al., 1990; Collin & Berg, 1994), 그리고 수치해석 (Karpurapu & Bathurst, 1995)등 많은 연구가 진행되어 왔으나, 이러한 연구의 대부분은 옹벽 상부에 등분포하중이 전반적으로 작용할 경우 수행되어 졌으며, 따라서 띠하중 형태의 상재하중이 재하되었을 경우 옹벽의 거동에 대한 이해가 부족한 실정이다.

블록식 보강토 옹벽의 경우, 독립기초 또는 연속기초가 벽체 상부에 인접 시공됨으로 인하여 띠하중 형태의 상재하중이 작용하는 경우가 빈번하다. 이러한 하중은 옹벽의 수평토압을 증가시키는데, 일반적으로 상재하중으로 인한 수평응력 증분은 2V:1H 분포법이나 Boussinesq 해법을 이용하여 계산되며, 그 결과를 이용하여 보강토 옹벽의 내·외적 안정성을 검토한다. 이러한 탄성론에 근거한 해석 방법으로 도출된 결과는 지반-구조물의 내적 상호작용을 고려할 수 없으므로, 이에 관한 적용성 여부에 대한 검토가 요구된다.

본 연구의 주목적은 상재하중이 블록식 보강토 옹벽의 거동에 미치는 영향에 대해 보다 합리적인 설계/해석법을 제시하기 위한 데이터 베이스를 구축하는데 있다. 본 연구에서는 신장성 보강재로 보강된 블록식 보강토 옹벽의 상부에 작용하는 띠하중의 위치를 변화시키며 매개변수 연구를 수행하였고, 설계법 개선에 관한 연구의 일환으로 현 설계기준에서 세부적으로 고려되고 있지 않은 제반 사항에 대해 2차원 유한요소 해석 결과 및 설계법을 정성·정량적으로 고찰하여, 그 결과를 토대로 현재 적용되고 있는 설계기준의 타당성을 검토하였다.

2. 해석시 고려사항

2.1 해석 조건

본 연구에서는 그림 1에 보이는 바와 같이 강성 기초 상에 0.25m(높이)×0.5m(길이)의 블록을 이용하여 높이 8m의 옹벽이 시공되는 경우를 고려하였으며, 보강재는 $L/H=0.6$ 과 보강재의 연직간격(S_v)=1.0m의 등간격으로 포설하였고, 양질의 사질토가 뒤채움흙으로 사용되는 경우를 고려하였다. 한편 보강재의 축강성은 $J=2000$ kN/m로 가정하였다.

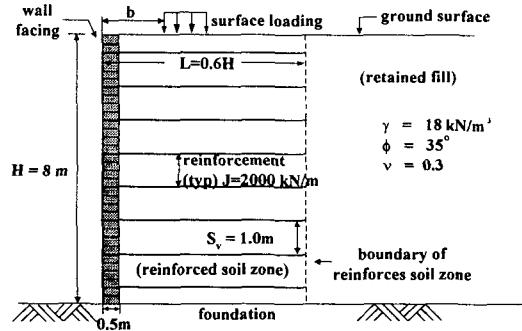


그림 1. 해석대상 단면도

2.2 매개변수 연구

본 연구에서는 유한요소해석법을 이용하여 상재하중의 효과에 대한 매개변수 연구를 수행하였으며, 해석시 광범위한 경계조건을 설정하여 상재하중의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 하였다. 상재하중이 보강토 옹벽의 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위해 옹벽 상단에 1.5m의 폭을 가진 띠하중의 위치를 $b/H=0.13, 0.25, 0.38, 0.5, 0.63, 0.75$ 로 변화시키며 해석을 수행하였으며, 하중의 크기는 극한지지력을 초과하지 않는 범위인 $q=100$ kPa로 고정하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 모델링

본 연구에서는 유한요소 해석시 네덜란드 TNO Building & Construction Research사와 Delft 공대에서 개발된 상업용 유한요소해석 프로그램인 DIANA (DIANA 1996)를 적용하였다. DIANA는 지반 및 터널굴착, 옹벽, 사면등의 지반공학에 관련된 문제를 효율적으로 모델링할 수 있는 범용 유한요소 프로그램이다.

그림 2는 해석시 적용된 유한요소 망을 보여주고 있는데, 보이는 바와 같이 해석대상 영역의 이산화 과정에서의 오차를 최소화하기 위하여 대략 980개의 절점과 1050개의 요소를 사용하였으며, 벽체전면에서 옹벽 배면으로 약 3.0H에 해당하는 영역을 뒤채움 영역으로 모델링하였다.

해석을 수행함에 있어 뒤채움흙 및 벽체는 4절점 등매개변수(isoparametric) 평면변형을 요소를, 보강재는 2절점 트러스 요소를 사용하여 모델링하였으며, 보다 정확한 해석을 수행하기 위하여 벽체/뒤채움흙, 보강재/뒤채움흙, 그리고 뒤채움흙/기초지반의 접촉면에 Goodman등(1968)의 4절점 상호면 요소를 적용하여 구성요소들 간의 상호작용을 모델링하였다. 그림 3은 보강재/벽체/뒤채움흙 사이의 상호면 요소 모델링 상세도를 보여주고 있다.

뒤채움흙의 비선형 거동은 Mohr-Coulomb의 파괴규준과 Davis(1968)가 제안한 비관련 유동법칙(non-

associated flow rule)을 따르는 탄소성 재료로 모델링하였으며, 뒤채움흙의 팽창각(dilatancy angle) ψ 는 Bolton(1986)이 제안한 식(1)과 같이 내부마찰각 ϕ 와 한계상태 마찰각 $\phi_{cv}=30^\circ$ 간에 다음과 같은 관계가 있는 것으로 가정하였다.

$$\phi = \phi_{cv} + 0.8\psi \quad (1)$$

한편, 벽체 및 보강재, 그리고 상호면 요소는 선형 탄성거동을 하는 것으로 간주하였다. 표 1은 해석에 적용된 구성요소의 역학적 특성을 나타낸다.

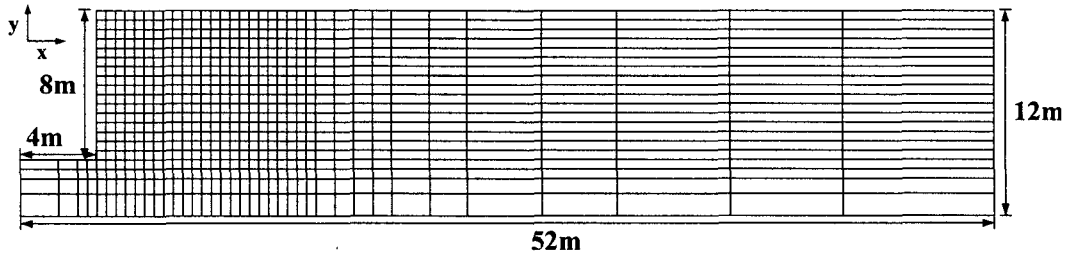


그림 2. 해석에 적용된 유한요소망

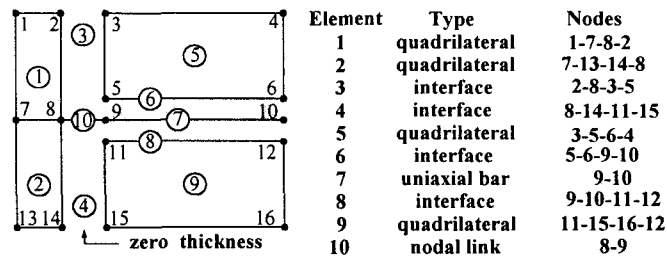


그림 3. 보강재/벽체/뒤채움흙 모델링 상세도

표 1. 해석에 적용된 구성요소의 역학적 특성

	뒤채움흙/벽체 물성치				
	E_s (kPa)	ϕ (degree)	ψ (degree)	γ (kN/m ³)	EI (kN-m ²)
뒤채움흙	3×10^4	35	6	18	-
벽체	-	-	-	21	5,500
	상호면요소 물성치				
	K_s (kPa/m)		K_n (kPa/m)		
뒤채움흙/벽체	1×10^4		1×10^{10}		
뒤채움흙/보강재	1×10^5		1×10^{10}		

3.2 시공과정의 모델링

현장 시공시 성토후 블록 및 보강재를 설치하는 일련의 작업이 반복적으로 수행되어지는 보강토 옹벽과 같은 토류구조물의 수치해석시 시공과정에 대한 정확한 모델링이 필수적이다. 따라서 정확한 결과를 얻기 위해 본 연구에서는 그림 4와 같이 단계별 해석을 이용하여 옹벽의 시공이 완료될 때까지 블록, 뒤채움흙, 보강재가 순차적으로 시공되는 과정을 상세히 모델링하였다. 한편, 상재하중은 시공 완료 후 옹벽 상부에 100kPa의 띠하중을 20단계에 걸쳐 점증적으로 작용시켰다.

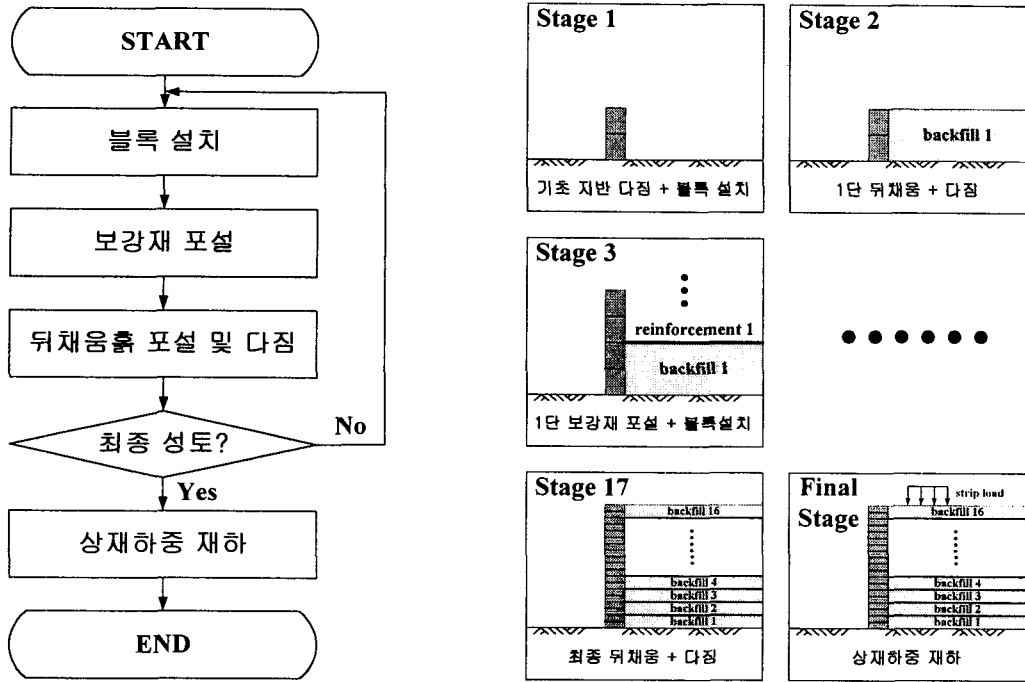


그림 4. 시공과정의 모델링

4. 상재하중의 영향

4.1 수평 변위 및 보강재 축력

그림 5는 b/H 가 증가함에 따른 벽체변위와 보강토체 배면 및 내부에서의 수평변위 (δ_h)를 보여주고 있는데, 보강토체 내부의 수평변위는 벽체 전면의 수평변위에서 보강토체 배면의 수평변위를 감하여 얻을 수 있다. $b/H \leq L/H$ 인 경우(상재하중이 보강토체 내부에 위치), 보강토체 내부변위에 큰 영향을 미치나 배면변위에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타나며, 이와는 반대로 $b/H \geq L/H$ 인 경우, 상재하중으로 인해 발생하는 보강토체 배면의 수평력으로 인하여 내부 및 배면변위에 모두 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 띠하중이 보강토체 직후면에 위치했을 때($b/H=0.63$), 보강토체 내부 및 배면에서의 수평 변위 변화량이 급격히 증가하는 경향이 나타나며, 이는 상재하중이 보강토체 외부에 위치하더라도 보강 토체의 거동에 대한 상재하중의 효과를 무시할 수 없음을 보여준다.

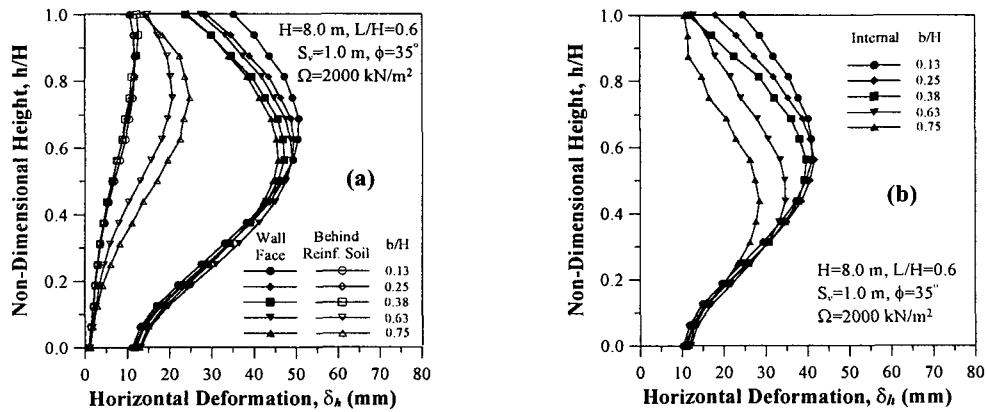


그림 5. b/H 에 따른 수평변위 변화 ($S_v=1.0m$): (a) 벽체 및 보강토체 배면; (b) 보강토체 내부

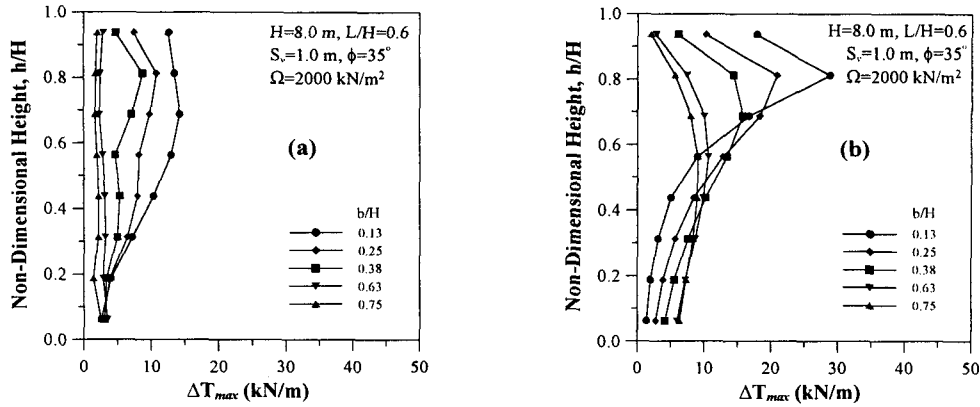


그림 6. b/H에 따른 보강재의 축력분포 변화: (a) 유한요소해석; (b) Boussinesq Solution

그림 6은 상재하중의 위치에 따른 보강재 축력 증분량(ΔT_{max})의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 ΔT_{max} 의 분포경향은 보강토체 내부에서의 수평변위 경향과 유사하며, b/H가 증가할수록 ΔT_{max} 은 감소하고 Boussinesq식에 의해 산정된 결과와의 차이가 증가하는 것으로 나타나고 있는데, 이는 Boussinesq식에 의해 산정된 보강재 축력이 유한요소 해석결과에 비해 과다평가함을 의미한다.

4.2 연직 및 보강토체 배면에서의 수평응력 분포

그림 7(a)는 보강토체 저부에서의 연직응력 변화를 보여주는데, b/H가 증가할수록 최대 연직응력 ($\sigma_{v, max}$) 또한 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은 상재하중이 벽체로부터 멀어질수록 보강토체에 작용하는 편심이 증가함으로 인하여 연직응력 또한 점차 증가하는 것으로 판단된다. 상재하중이 보강토체 직후면에 위치할 경우, 최대 연직응력은 Meyerhof 연직토압 분포를 초과함으로 Meyerhof 연직토압 분포를 이용한 기초지지력 산정시 주의를 요한다.

그림 7(b)는 b/H에 따른 보강토체 배면에서의 수평응력 분포를 나타낸다. 보이는 바와 같이 상재하중이 벽체로부터 멀어질수록 저부에서의 응력은 감소하고, 상부에서는 증가하는 경향을 나타낸다. 수평응력은 상재하중이 보강토체 바로 뒤에 위치할 경우 옹벽 상단에서 최대가 되며, 이로 인해 작용모멘트 및 보강토체 저부에서의 연직응력이 증가하므로 블록식 보강토 옹벽의 내·외적 안정성 검토시 주의 깊은 평가가 요구된다.

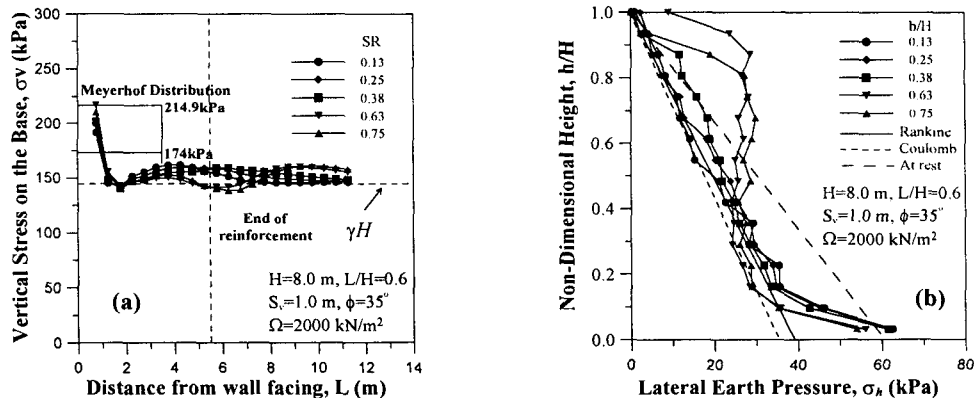


그림 7. b/H 따른 응력분포 변화: (a) 보강토체 저부에서의 연직응력; (b) 보강토체 배면에서의 수평응력

5. 설계법과의 비교

본 연구에서는 NCMA 및 FHWA 등 현 설계기준의 타당성을 검토하기 위하여 보강토 옹벽의 상부에 작용하는 띠하중으로 인한 보강재 축력 증분(ΔT_{max})에 대해 유한요소 해석결과와 현 설계기준을 비교·검토하였다.

5.1 NCMA 설계기준

NCMA 설계기준에서는 그림 8에 보이는 바와 같이 균질성(homogeneous) 및 등방성(isotropic)을 지닌 반무한 탄성지반의 표면에 상재하중 작용시 지반내의 응력증분량을 계산하는 Boussinesq 공식을 이용하여 상재하중으로 인한 보강토체 내부의 수평응력 증분을 산정한다. 단위 면적당 하중 q 및 폭이 B 인 띠하중 작용시 보강토체 내부의 수평응력 증분량은 식(2)와 같으며, 이와 같이 계산된 수평응력 증분량을 토대로 기여영역(contribute area) 개념을 적용하여 보강재의 축력 증분을 계산한다.

$$\Delta\sigma_h = (2 - R) \frac{q}{\pi} [\beta - \sin\beta \cos\beta + 2\delta] \quad (2)$$

여기서, R 은 뒤채움흙과 보강재의 강도특성에 근거한 감소계수이다.

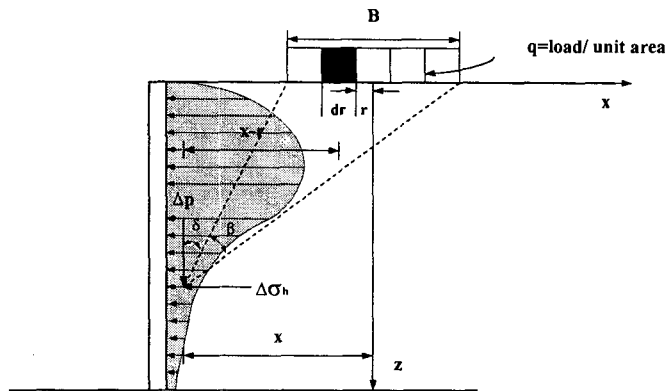


그림 8. 띠하중에 의한 수평응력 증분 (Boussinesq)

5.2 FHWA 설계기준

FHWA 설계기준에서는 그림 9에 보이는 바와 같이 2V:1H 하중분포법을 이용하여 지반 내에 발생하는 연직응력의 증분량을 식(3)과 같이 산정한다. 이와 같이 계산된 상재하중에 의한 연직응력의 증분량은 식(4)에 의해 수평응력의 증분량으로 환산되며, 각 보강층에서의 보강재 축력 증분은 식(5)와 같이 보강재 연직간격을 수평응력 증분량에 곱하여 산정한다.

$$\Delta\sigma_v = \frac{P_v}{D_1} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_h = K_a \times \Delta\sigma_v \quad (4)$$

$$T_{max} = \sigma_H \cdot S_v \quad (5)$$

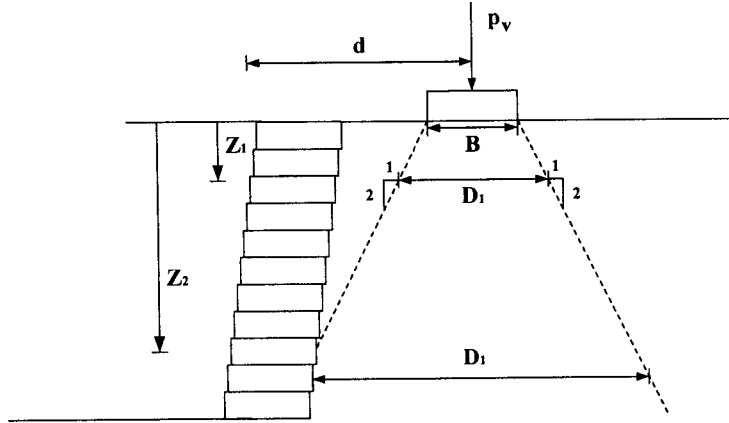


그림 9. 띠하중에 의한 연직응력 증분 (2V:1H 하중분포법)

5.3 결과 분석 및 고찰

그림 10과 그림 11은 동일한 상재하중 조건에 있어서 유한요소 해석에서 얻어진 보강재의 축력증분 (ΔT_{max})을 각각 NCMA 및 FHWA 설계기준에 의해 계산된 결과로 정규화시켜 유한요소 해석결과와 설계기준을 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 유한요소 해석결과와 NCMA 설계기준의 비교에서는 $b/H=1.0$ 인 경우를 제외하고는 대부분의 경우 $\Delta T_{max(FEM)}/\Delta T_{max(NCMA)}$ 의 값이 1.0이하로 나타나고 있는데, 이는 보강토 옹벽의 실제 거동에 관한 예측치에 비해 NCMA 설계기준이 과다설계되고 있음을 의미하며, b/H 가 증가할수록 보수적 성향이 점차 커짐을 알 수 있다. 한편, 유한요소 해석결과와 FHWA 설계기준간의 비교에서도 NCMA 설계기준과의 비교에서 나타난 결과와 유사한 경향을 보여준다.

그림 12는 보강토 옹벽의 설계시 적용되어지고 있는 현 설계기준인 NCMA와 FHWA의 보강재에 작용하는 축력 증분을 증분인장력비 $\Delta T_{max(NCMA)}/\Delta T_{max(FHWA)}$ 를 이용하여 비교하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 두 설계기준은 모두 유한요소 해석결과와 비교해볼 때 과대평가 경향을 보이며, 두 설계기준간의 직접적인 비교를 수행한 결과 b/H 가 증가함에 따라 옹벽상단에서는 FHWA 설계기준이 NCMA 설계기준에 비해 점차 보수적 성향이 커지는데 반하여, 옹벽저부에서는 NCMA 설계기준이 보다 과대평가 되는 경향이 나타났다. 이와 같이 NCMA 및 FHWA 두 설계기준은 동일한 내적 안정성 검토모형을 적용함에도 불구하고 보강재에 작용하는 축력 산정시 수평응력 증분 선정기준의 차이로 인하여 보강재 축력이 상이한 것으로 나타나고 있으므로 이에 대한 적합한 수평응력 증분 선정기준의 정립이 요구된다.

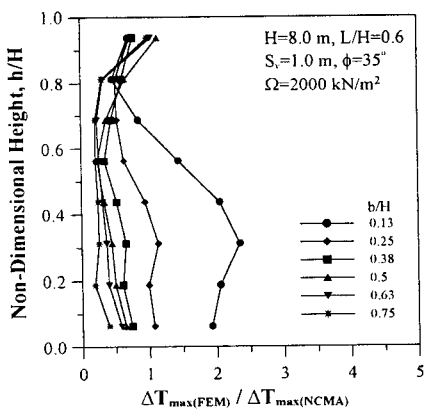


그림 10. FEM vs. NCMA

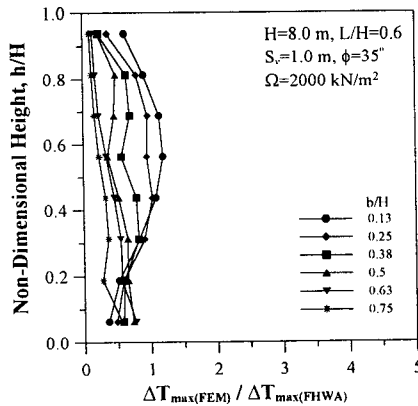


그림 11. FEM vs. FHWA

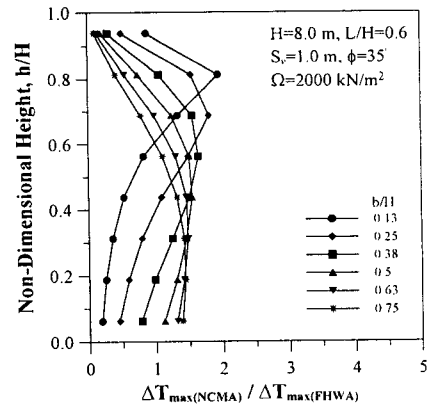


그림 12. NCMA vs. FHWA

6. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 상재하중이 블록식 보강토 옹벽의 거동에 미치는 영향을 고찰하였으며, 수평변위, 보강재 축력, 연직 및 수평응력에 관한 결과를 토대로 현 설계기준의 타당성을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수평응력 증분 산정시 적용되어지는 탄성론에 근거한 현 설계법은 보강재 축력 증분에 대해 과다설계하는 경향이 나타나며, 상재하중이 벽체로부터 멀어질수록 설계법상의 보수적 성향이 커진다.
2. b/H 가 증가할수록 보강토체 배면과 저부에서의 수평 및 연직응력이 증가하는 경향을 보이는데, 이러한 경향은 상재하중이 벽체로부터 멀어질수록 보강토체 배면에 작용하는 수평력 및 편심의 영향이 점차 커짐으로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 그러므로 상재하중이 작용하는 경우, 보강토 옹벽의 내·외적 안정성 평가시 이에 대한 고려가 필요하다.
3. 내적안정성 검토에 있어서 상재하중에 의한 유발인장력 증분 계산시 NCMA 및 FHWA 두 설계기준 모두 상단부 보강재의 유발인장력이 증가하는 모형을 적용하고 있으나, 수평응력 증분 선정 기준의 차이로 인하여 b/H 가 증가함에 따라 NCMA 설계기준은 옹벽 하단부에서의 인장력이 증가하는 반면, FHWA 설계기준은 옹벽 상단부에서의 인장력이 증가하는 상반된 결과를 나타낸다. 따라서 이에 대한 적합한 수평응력 증분 선정기준의 정립이 요구된다.
4. 본 연구에서의 유한요소 해석결과와 설계/해석법을 종합적으로 분석해 볼 때, 현 설계기준이 안전측의 결과를 나타내므로 설계시 현 설계/해석법을 적용하는데 있어 큰 무리가 없을 것으로 판단되어지나, 공비 절감 및 시공의 편의를 위해 이에 대한 보다 구체적인 연구가 요구된다.

참고문헌

1. Bathurst, R.J.(1990), "Instrumentation of Geogrid-Reinforced Soil Walls", *Transportation Research Record*, No. 1277, Soils, Geology, and Foundations, Modern Geotechnical Methods: Instrumentation and Vibratory Hammers, pp. 109-116.
2. Bathurst, R.J. and Benjamin, D.J.(1990), "Failure of a Geogrid-Reinforced Soil Wall", *Transportation Research Record*, No. 1288, Soils, Geology, and Foundations, Geotechnical Engineering, pp. 109-116.
3. Bolton, M.D.(1986), "The strength and dilatancy of sands", *Geotechnique*, London, U.K., 36(1), pp. 65-78.
4. Collin, J.G. and Berg, R.R.(1994), "Permanent Geogrid Reinforced Soil Retaining Walls US Experience", *Proceeding Recent Case Histories of Permanent Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls*, Tatsuoka, F. and Leshchinsky, D., pp. 61-68.
5. Davis, E.H.(1968), "Theories of plasticity and the failure of soil masses", *Soil mechanics: Selected Topics*, I. K. Lee, ed., Butterworths, London, U.K., pp. 341-380.
6. DIANA Users Manual, 1996, Release 6.1, TNO Building and Construction Research, Netherlands.
7. Juran, I. and Christopher, B.(1989), "Laboratory Model Study on Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 7, pp. 905-926.
8. Kapurapu, R. and Bathurst, R.J.(1995), "Behavior of Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls Using the Finite Element Analysis", *Computers and Geotechnics*, Vol. 17, pp. 179-299.
9. Simac, M.R. et al.(1990), "Instrumented Field Performance of a 6 m Geogrid Soil Wall", *Proceeding 5th International Conference On Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, edited by Den Hoedt, pp. 53-59.