

계단식 보강토 옹벽 설계시 사면안정해석의 중요성

Importance of global slope stability analysis in design of geosynthetic reinforced walls in tiered configuration

유충식¹⁾, Chung-Sik Yoo, 김선빈²⁾, Sun-Bin Kim

¹⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS : This paper highlights the importance of carrying out global slope stability analysis as part of design calculations for geosynthetic walls in tiered configuration. Four design case histories were selected to examine the appropriateness of their design by performing additional slope stability analyses using the shear strength reduction method with in the frame work of finite element analysis. The results indicated that all of the walls examined, which were designed to meet the current design guide lines, did not satisfy the global slope stability requirement, and that longer reinforcements are required in the upper tiers to achieve the minimum factor of safety. Practical implications of the findings are discussed.

Key words : geosynthetic reinforced wall, tiered configuration, global slope stability, strength reduction method, finite element analysis

1. 서론

보강토 옹벽은 1990년대에 우리나라에 소개된 이래 건축현장 및 도로 성토 현장 등에서 활발히 적용되고 있다. 그동안 많은 시행착오를 겪었고 현재도 겪고 있으나 다양한 시공환경에서 기존 콘크리트 옹벽의 대체공법으로서 자리매김을 하고 있는 등 효율적인 공법으로 인정받고 있다. 최근 들어 국내·외에서 보강토 옹벽 공법을 관 발주 현장, 즉, 도로 혹은 철도 현장에도 적용하는 추세여서 보다 안전한 보강토 구조물의 설계/시공이 절대적으로 필요하다.

보강토 옹벽이 장대화 될 경우 시각적인 부담을 줄이고 보강토체에 작용하는 응력 수준을 감소시키기 위해 다단식 형태의 옹벽으로 시공되는 경우가 많다. 현재 우리나라의 설계지침의 근간을 이루고 있는 NCMA 설계기준(Collins 1997) 이나 FHWA 설계기준 (Elias 등 1997)에서는 다단식 옹벽의 설계기준을 제시하고 있으나 설계기준 자체가 상·하단 옹벽의 이격거리를 고려하여 상단옹벽을 상재하중으로 환산하여 하단옹벽에 작용하는 하중을 산정하는 방식으로 채택하고 있는데 경험적인 부분이 많이 가미되어 있는 설계기준으로 평가되고 있다. 이러한 설계기준은 각 설계기준에서 기술하고 있는 바와 같이 예비설계를 위한 설계법으로 인식되어야 할 필요가 있다(유충식 2002).

본 논문은 유충식 (2002)의 논문을 재 구성한 내용을 담을 것으로서 실제 현장 적용된 네 개의 옹벽 설계 단면에 대해 사면안정해석을 수행하여 포설조건의 타당성을 재 검토하였으며 그 내용을 토대로 다 단식 옹벽의 설계에 있어서 사면안정해석 수행의 중요성을 기술하였다.

2. 다단식 보강토 옹벽 설계기준

앞서 기술한 바와 같이 다단식 옹벽은 NCMA 설계기준(Collins 1997) 혹은 FHWA 설계기준(Elias 등 1997)을 적용할 수 있다. 두 설계기준 모두 상단옹벽은 상재하중으로 간주하고 이를 하단옹벽에 작용시켜 하단옹벽의 내·외적 안정성 검토시 적용한다. 이때 상재하중의 크기는 상·하단 옹벽의 이격 거리에 따라 결정되며 상단옹벽은 개별옹벽, 즉 단일옹벽으로 설계된다. 여기서 인지해야할 점은 북미에서는 NCMA 설계기준은 민간발주 프로젝트에 적용하며 FHWA 설계기준은 관발주 프로젝트에 적용한다는 점이다. 즉, 두 설계기준 중 선택하여 적용하는 것이 아니라 대상 설계 프로젝트의 성격에 따라 그 용도가 확실히 구분되고 있다.

그림 1과 2는 각각 NCMA 설계기준과 FHWA 설계기준을 개략적으로 도시하고 있다. 객관적으로 평가하자면 NCMA 설계기준 보다는 FHWA 설계기준이 보다 설계조건에 따른 상단옹벽의 영향을 보다 상세하게 적용하는 것으로 평가되고 있다.

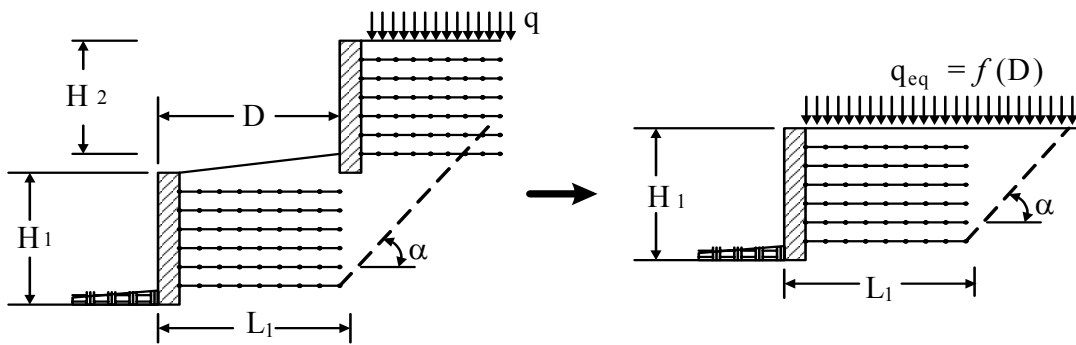


그림 1. NCMA 설계기준

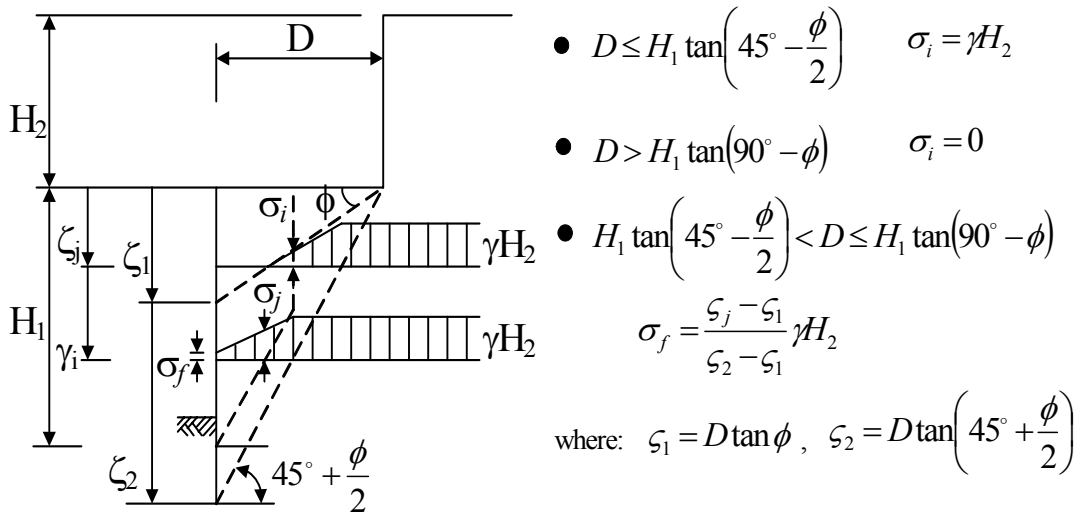


그림 2. FHWA 설계기준

여기 중요한 점은 NCMA 설계기준이나 FHWA 설계기준 모두 위에 제시된 상단옹벽 처리 기준은 예비설계개념으로서 반드시 사면안정개념의 복합과괴 혹은 전반과괴 해석을 수행하여 예비설계에서 선정된 포설조건을 재 검토 할 것을 제안하고 있다. 사면안정해석에 의한 검토의 중요성을 다음 설계사례 검토에서 잘 확인할 수 있다.

3. 현장 옹벽의 설계단면에 대한 사면안정해석

3.1 현장옹벽 개요

유충식 (2002)에서 검토한 네 개의 현장에 대한 설계단면이 그림 3에 나타나 있다. 이 그림에는 보강재 포설조건 또한 도시되어 있는데 네 설계단면의 경우 보강재의 허용인장 강도를 어떻게 설정하는가에 따라 다소 달라질 수는 있으나 NCMA과 FHWA 설계기준을 만족하도록 설계되어 있다.

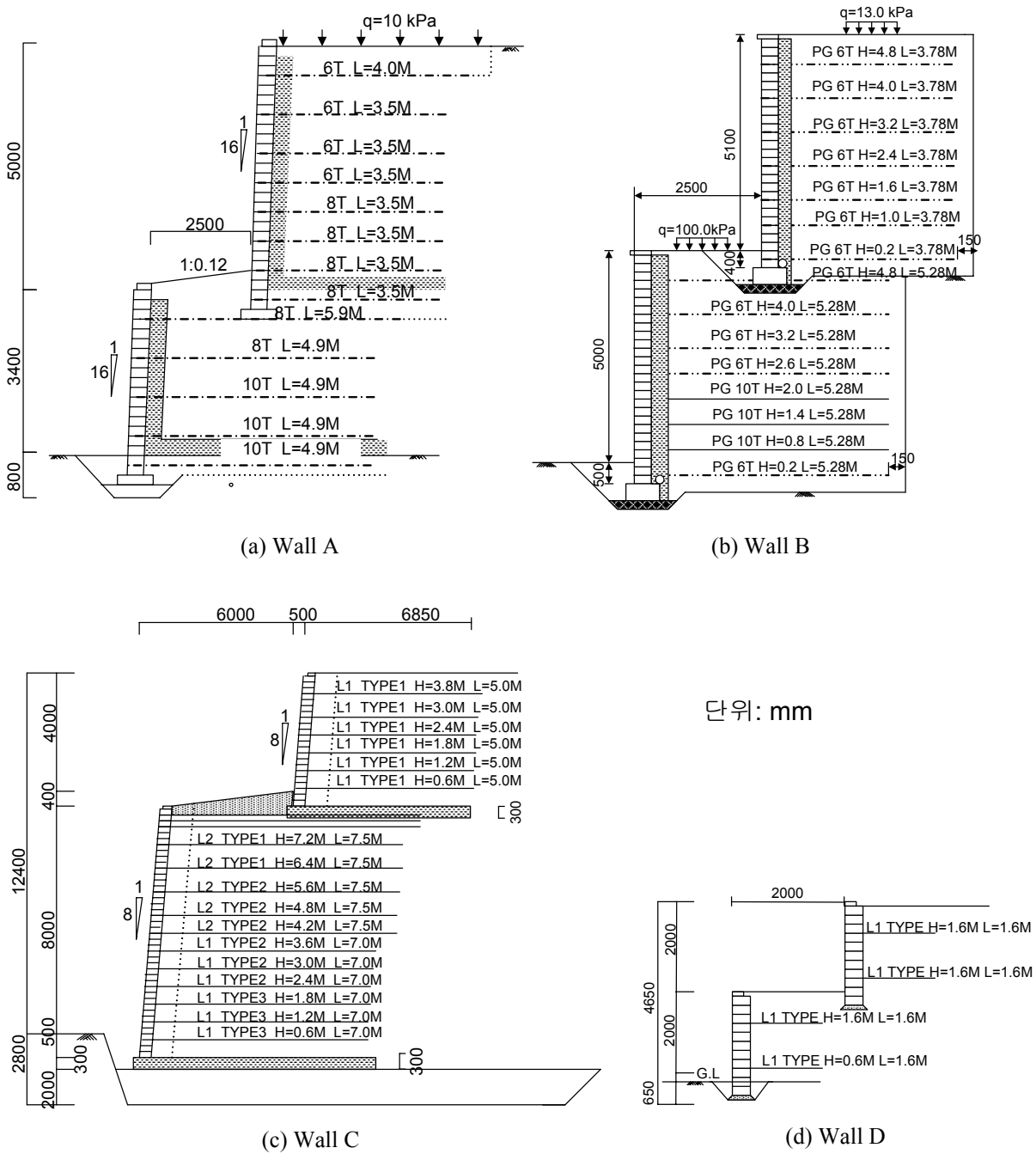


그림 3. 검토대상 옹벽 단면도

3.2 사면안정해석

위에 제시된 네 개의 설계단면에 대한 사면안정해석을 수행하였는데 여기서는 한계평해석과 더불어 유한요소해석법에 근거한 강도감소기법을 이용한 해석을 수행하였다. 한계평형해석과 강도감소법에 근거한 안정해석에서는 각각 MSEW ver. 1.0 (Leshchinsky 1999)과 Phase² (Rocscience, 2005)를 적용하였다.

강도감소기법은 Griffiths와 Lane (1999)이 언급한 바와 같이 유한요소 혹은 유한차분법과 같은 연속체해석기법에 근거하여 수행할 수 있는 사면안정해석 기법으로서 기존의 한계평형법과 비교하여 사전에 파괴면의 유형을 정의할 필요가 없다는 장점이 있다. 즉, 강도감소 기법은 식 (1)과 (2)로 정의 되는 기존의 안전율 개념을 토대로 인위적으로 강도정수를 감소시켜 한계상태를 유도하여 안전율을 찾는 방법으로서 더 이상의 해석을 수행할 수 없는, 즉 불평형 상태 혹은, 한계상태의 강도정수(c'_f, ϕ'_f)를 시행착오법으로 찾는 개념으로 안전율을 산정할 수 있다.

$$c'_f = \frac{c'}{FS} \quad (1)$$

$$\phi'_f = \frac{\phi'}{FS} \quad (2)$$

상세한 해석 기법은 Griffiths와 (1999)에 제시되어 있다.

그림 4~7에서는 한계평형법 및 강도감소기법을 토대로 산정한 파괴유형과 안전율을 용벽별로 제시하고 있다. 여기서 관찰할 수 있는 바와 같이 한계평형법과 강도감소기법 공히 매우 근접한 안전율을 도출하고 있어 강도감소기법 또한 토류구조물의 안전율 산정시 매우 효율적으로 적용할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 용벽별로 산정한 안전율은 모든 용벽에 있어 1.0에 못 미치고 있어 NCMA 또는 FHWA 예비설계기준을 만족한다고 하더라도 이론적으로는 불안정한 포설조건이 될 수 있는 것으로 나타났다. 물론 뒤채움흙의 강도정수 설정 및 보강재의 허용인장강도 설정 방법에 따라 결과에 있어서 다소 차이가 있을 수는 있겠으나 이러한 결과는 사면안정해석을 통해 당초 예비설계에 대한 재 검토의 중요성을 의미한다고 하겠다.

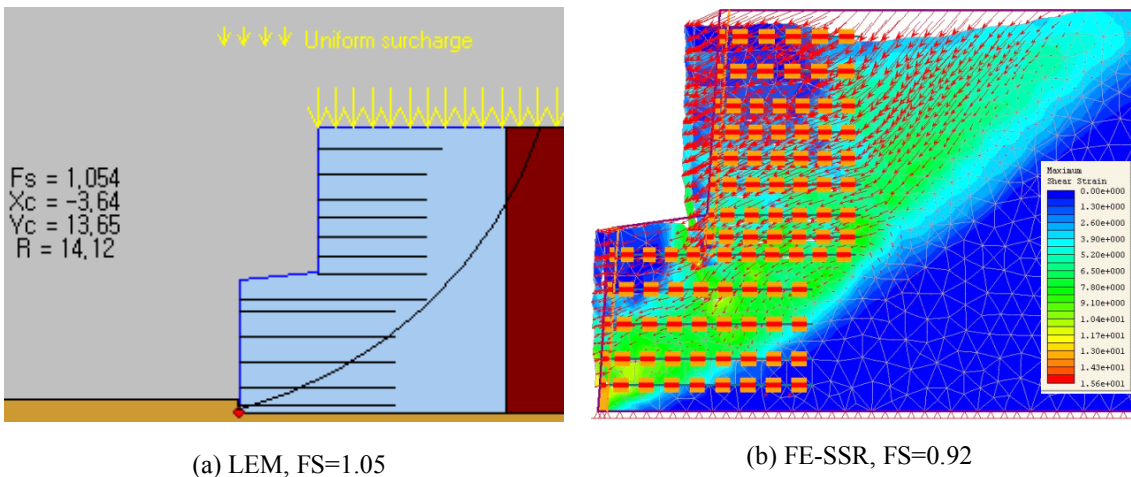
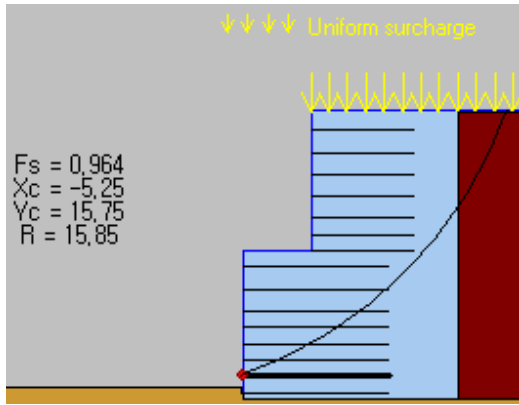
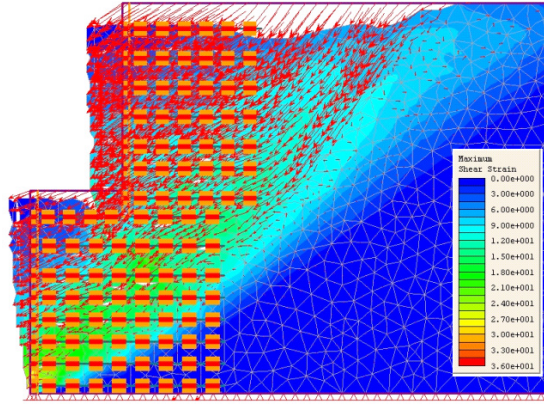


그림 4. 사면안정해석 결과: Wall A

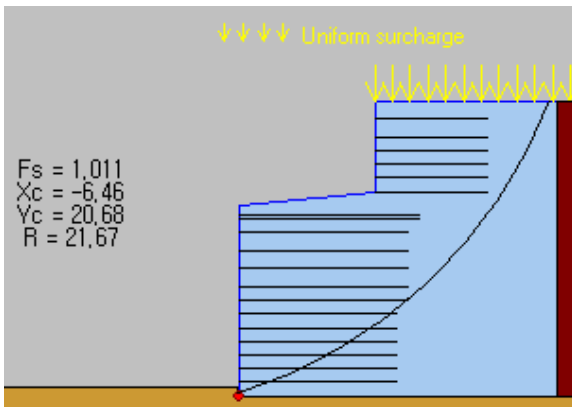


(a) LEM. FS=0.96

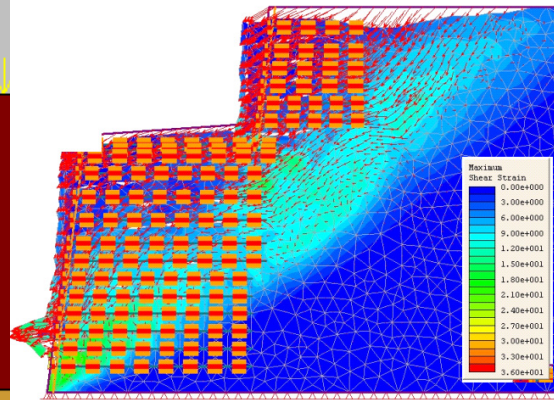


(b) FE-SSR. FS=0.93

그림 5. 사면안정해석 결과: Wall B

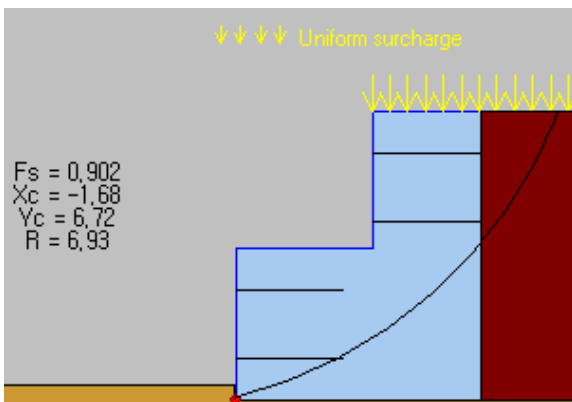


(a) LEM. FS=1.01

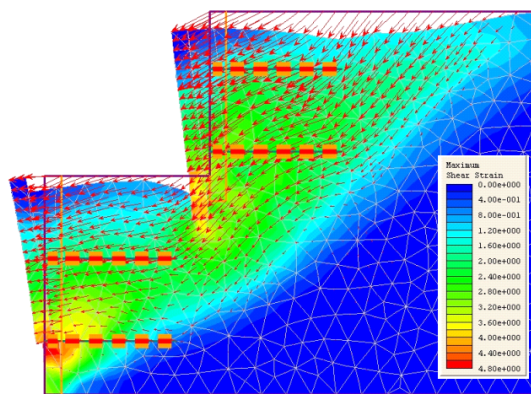


(b) FE-SSR. FS=0.98

그림 6. 사면안정해석 결과: Wall C



(a) LEM. FS=0.90



(b) FE-SSR. FS=0.82

그림 7. 사면안정해석 결과: Wall D

4. 다단식 옹벽의 상·하단 옹벽 상호작용

4.1 검토조건

본 절에서는 다단식 옹벽 시공시 상·하단 옹벽의 상호작용에 따른 옹벽의 거동에 대한 검토를 위해 상·하단옹벽의 높이가 각각 5m인 옹벽에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 옹벽의 이격거리의 변화에 따른 상호작용 고찰을 위해 이격거리 0.25H, 0.5H, 1.0H(여기서 H=옹벽 총 높이)에 대한 해석을 수행하였으며 편의상 상·하단 보강재 길이는 $L_1 = L_2 = 0.7H$ 로 고정하였다. 유한요소해석은 Abaqus 6.7 (Abaqus 2007)을 이용하여 수행하였으며 뒤채움흙 및 배면토는 Duncan-Chang 모델 (Duncan 등, 1980)을 이용하여 모델링하였으며 보강재는 축강성 2000 kN/m을 갖는 선형 탄성재료로 모델링하였다. 표 1은 해석에 적용한 모델 파라미터를 정리하고 있다. 뒤채움흙 및 배면토는 8절점 가감적분요소 (CPE8R)을 이용하여 이산화 하였으며 보강재는 3절점 트러스요소(T3D2)를 적용하였다. 그림 8은 해석에 적용된 유한요소망을 보여주고 있다.

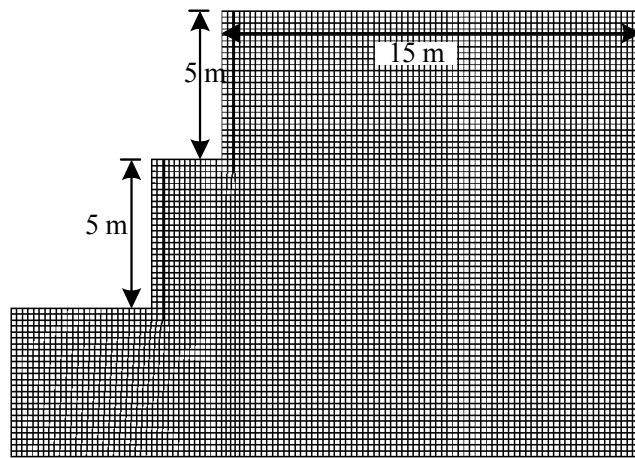


그림 8. 해석에 적용된 유한요소망 예시

표 1. Duncan-Chang 모델 파라미터

모델 parameter	뒤채움흙
Cohesion (c' , kPa)	0
Internal friction angle (ϕ' , deg)	32
Stiffness modulus number for primary loading (K)	300
Stiffness modulus number for unloading-reloading (K_{ur})	350
Bulk modulus number (K_b)	175
Stiffness modulus exponent (n)	0.5
Bulk modulus exponent (m)	0.2
Failure ratio (R_f)	0.8

Note: 단위중량 = 18 kN/m³, 포아송비 = 0.3, 블록벽체 휨강성 = 20 MN·m²/m.

4.2 결과 분석

그림 9에서는 해석결과를 토대로 작성된 상·하단 보강재의 유발인장력 분포도를 보여주고 있다. 여기서는 NCMA 및 FHWA 설계기준으로 산정된 유발인장력 분포도 또한 함께 제시되어 있다. NCMA 및 FHWA 설계기준 적용 측면에서 이 그림에서 관찰할 수 있는 두 가지 특이사항은 다음과 같다. 먼저 FHWA 설계기준이 NCMA 설계기준에 보다 보수적인, 즉 더 큰 유발인장력을 제시한다는 점이며, 그 차이는 이격 거리가 증가할수록 감소하는 추세를 보이고 있다. 또하나의 유의할 사항은 상단 보강재의 유발인장력 분포경향으로서 이격거리에 관계없이 설계기준으로 산정한 유발인장력과 거의 같은 크기의 유발인장력이 발생하며 이격거리가 증가에 따라 그다지 별 차이가 없다는 점이다. 한편 해석결과에 의하면 상단보강재의 유발인장력은 설계기준으로 산정된 유발인장력과 별차이를 보이고 있지 않는데 일반적으로 보강토 옹벽에 대한 유한요소 혹은 유한차분해석을 수행할 경우 유발인장력이 설계기준 대비 50%이하에 머무른다는 점을 감안할 때 이러한 해석 결과는 상단 옹벽의 거동이 상·하단 옹벽의 상호작용에 의한 영향으로 개별옹벽의 거동과는 상이한 거동을 보인다고 할 수 있다. 이러한 결과는 NCMA 설계기준이나 FHWA 설계기준에서 상단옹벽은 개별옹벽으로 간주하여 설계할 것을 제안하고 있는데 이는 상·하단 옹벽의 상호작용을 무시하는 것으로서 이 부분에 대한 구체적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

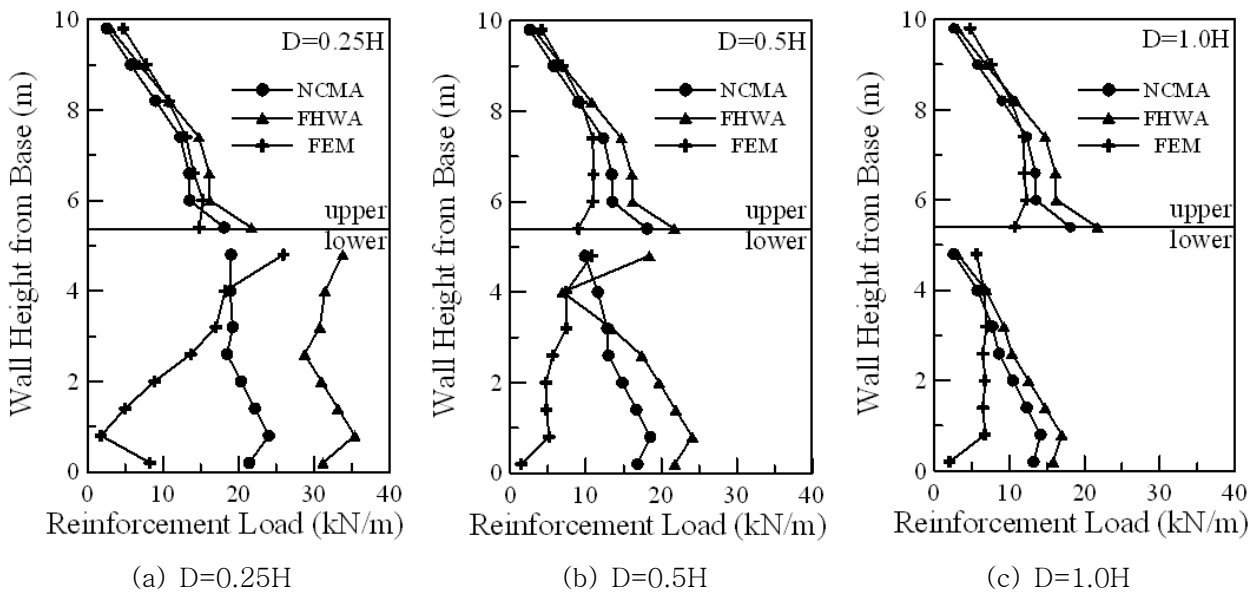


그림 9. 이격거리에 따른 보강재 유발인장력

5. 결론

본 논문은 다단식 옹벽의 설계/시공의 재조명 관점에서 현장 적용된 네 개의 옹벽 단면에 대해 현재 설계시 적용하고 있는 NCMA 및 FHWA 설계기준에 의한 포설조건이 사면안정 개념의 전반활동에 대한 안정성 여부를 검토하여 단단식 옹벽의 설계시 사면안정해석 수행의 중요성을 기술하였다. 검토 결과 NCMA 또는 FHWA 설계기준에서 제시하는 예비설계 기준을 만족한다고 하더라도 사면안정 개념의 전반과괴에 대한 안정성은 확보하지 못하는 것으로 나타나 다단식 보강토 옹벽의 설계시에는 설계기준에 의한 예비설계 후 사면안정해석에 의한 추가 검토가 반드시 필요한 것으로 나타났다. 한편, 가상

의 옹벽조건에 대해 이격거리에 따른 상·하단 옹벽의 상호작용 검토를 위해 수행한 유한요소해석 결과 다단식 옹벽에서 상·하단 옹벽의 상호작용은 상단옹벽의 거동에도 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이는 상단옹벽을 개별옹벽으로 설계할 것으로 제안하는 NCMA 및 FHWA 설계기준과는 다소 상충되는 결과로서 설계시 각별한 주의가 요망된다.

감사의글

본 연구는 2007년 건설교통부가 출현한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700), 그리고 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0)의 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유충식 (2002), “다단식 보강토옹벽의 설계사례-사례연구”, 한국토목섬유학회논문집, 제 1권, 제 1호, pp. 31~41.
2. Abaqus users manual, Version 6.7., 2007. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
3. Collin, J.(1997), "Design Manual for Segmental Retaining Walls." 2nd Ed. National Concrete Masonry Association(NCMA), Virginia, USA.
4. Duncan, J.M., Bryne, P., Wong, K.S. and Marbry, P.(1980), "Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses." *Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT.80-01*, University of California, Berkeley.
5. Elias, V. and Christopher, B.R.(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. Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999), "Slope stability analysis by finite elements". *Géotechnique* **49**, No.3, 387-403.
7. Leshchinsky, D. (1999). Putting Technology to Work: MSEW and ReSlope for Reinforced Soil-Structure Design. *Geotechnical Fabrics Report*, Vol. 18, 34-39.
8. Rocscience Inc. (2005), Phase² v6.0 Two dimensional finite element slope stability analysis.