

보강토 옹벽의 거동에 관한 유한요소해석

Finite Element Analysis on Mechanically Stabilized Earth Retaining Wall Behavior

유충식¹⁾, Chung-Sik Yoo, 이 호²⁾, Ho Lee

¹⁾성균관대학교 토목공학과 조교수, Asst. Professor, Dept. of Civil Eng., Sung Kyun Kwan Univ.

²⁾성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Sung Kyun Kwan Univ.

SYNOPSIS : This paper presents the results of finite element analysis on a mechanically stabilized earth retaining wall with concrete block facing. The system of reinforced wall, such as facing and reinforcing elements, and the construction sequence were carefully modelled in the analysis. Using the results of analysis, the mechanistic behavior of the reinforced wall was investigated such as the wall deformation, earth pressure distribution behind the wall, and the force distribution of reinforcements. Furthermore, based on a parametric study on reinforcing pattern, the effect of reinforcing pattern on the wall behavior was also evaluated.

KEYWORDS : finite element analysis, reinforced wall, reinforcement, reinforcing pattern

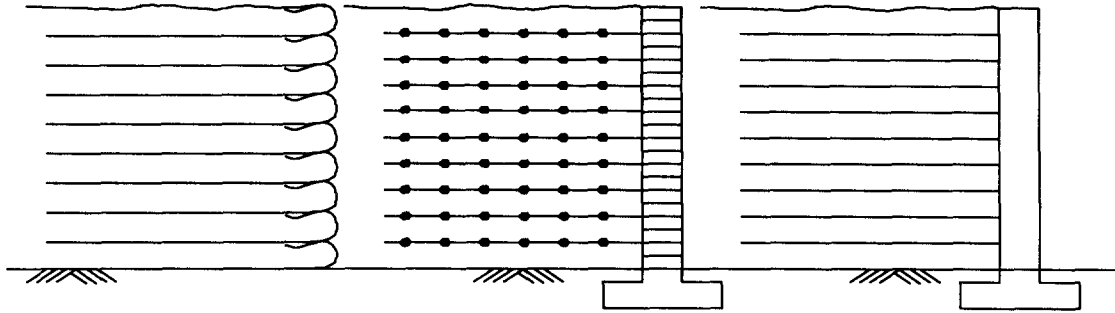
1. 서론

최근들어 미국, 일본 및 유럽에서 뿐만 아니라 국내에서도 보강토 옹벽(Mechanically Stabilized Earth Retaining Wall)이 매우 많이 적용되고 있다. 보강토 옹벽은 기존의 옹벽보다 경제적인 뿐만 아니라 역학적으로도 안정한 것으로 알려져 있어 앞으로 사용 물량이 현저히 증가될 것으로 전망되고 있다. 보강토 옹벽은 근본적으로 벽체 배면 뒷채움시 일정한 길이의 보강재를 일정한 간격으로 포설하여 뒷채움재에 의해서 발생하는 토압의 일부를 보강재가 부담하도록 하는 개념으로 설계되며, 앞서 언급한 바와 같이 기존의 옹벽에 비하여 우수한 시공성 및 경제성을 바탕으로 그 적용성이 증가하고 있다. 또한 기존의 캔틸레버식 또는 중력식 옹벽보다 유연하므로 기초지반이 불량하거나 지진 활동이 우려되는 지역에 매우 효과적으로 적용될 수 있어 선진 외국에서는 이미 보편화 되어 있는 실정이며, 국내에서도 그 적용성이 증가하고 있는 추세이다.

일반적으로 보강토 옹벽의 설계 및 해석은 한계 평형 기법에 근거하여 수행되고 있으며, 따라서 보강토 옹벽의 구조물로서의 성능은 안전율(Factor of Safety)에 의해 결정된다. 즉 기존의 제안된 설계 기법은 가상의 파괴 형태를 고려한 한계 평형 기법을 토대로 내적 안정성(Internal Stability) 및 외적 안정성(External Stability) 검토를 수행하여 설계 안전율에 부합하는 보강재의 길이 및 포설 간격을 결정하게 되는데 이러한 경우 한계 평형 기법의 특성상 벽체의 변위 및 보강재에 발생하는 응력의 크기 등 보강토 옹벽에 관한 전반적인 거동에 대한 평가가 어렵다.

보강토 옹벽은 그림 1에 나타난 바와 같이 시공 방법에 따라 전면보호식(Wrapped Face), 블록

식(Block Type), 전면 지지식(Full Height Propped Type) 등으로 나눌 수 있으며, 시공방법에 따라 역학적 거동이 상이한 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 시공 중에 있는 블록식 보강토 옹벽에 대한 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 토대로 블록식 보강토 옹벽의 역학적 거동 특성을 알아보고 기존의 설계 기법의 타당성을 검토 하였다.



(a) Wrapped 전면판식 (b) 기성 콘크리트 블록형 전면판식 (c) 전면 지지식 기성 전면판식
그림 1. 토목섬유를 이용한 보강토 옹벽의 형태

2. ○○현장 보강토 옹벽 시공 사례

2.1 현장 개요

본 연구에서 채택한 해석 대상 현장은 경기도내의 “○○ 공사 현장”으로 단지내 주차장 조성시 좁은 면적을 효율적으로 활용하기 위해 블록식 보강토 옹벽이 채택되었다. 본 현장의 지반은 지표면으로부터 풍화토-풍화암-연암-경암 순으로 구성되어 있으며 옹벽의 기초 지반은 풍화암에 위치하도록 설계되어 있다. 본 현장 옹벽의 높이는 위치에 따라 12m~14m 정도로 구성되어 있으며 직선부와 곡선부로 이루어져 있다. 그림 2는 직선부와 곡선부의 단면도를 보여 주고 있다.

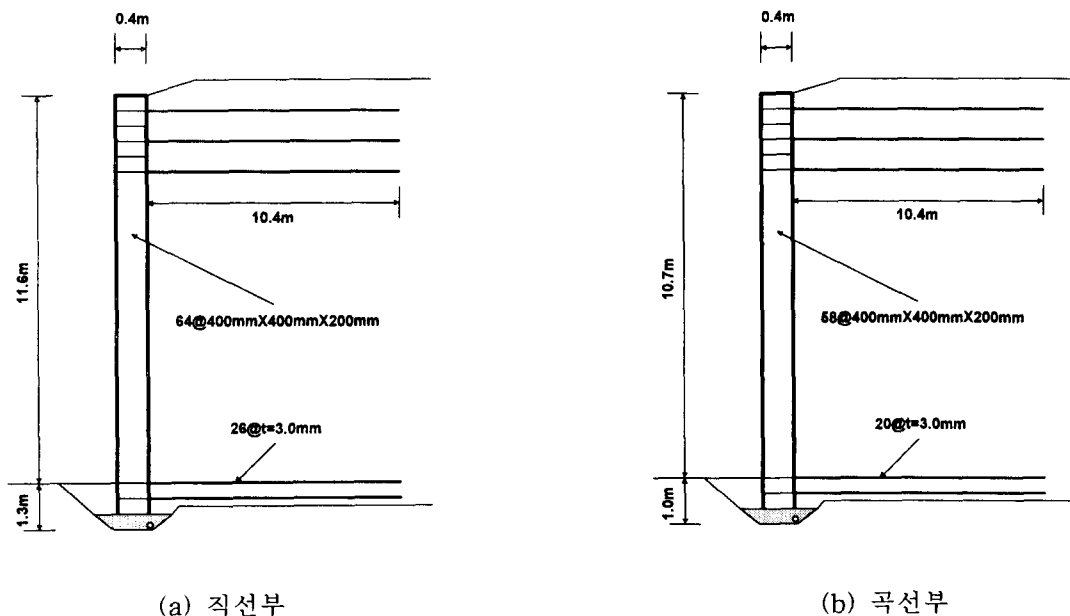


그림 2. 단면도

2.2 보강토 옹벽의 구성

본 현장에서 적용된 옹벽 블록은 고강도 콘크리트로 제작되며 210 kg/cm²의 재령 28 강도를 보유한다. 블록의 크기는 40cm×40cm×20cm이며 상·하 블록은 연결핀으로 연결된다. 한편 보강재로는 격자형의 연성 지오그리드가 사용되었다. 표 1은 적용된 지오그리드의 제원 및 역학적 특성을 나타내고 있다.

표 1. 지오그리드의 역학적특성

제품종류	10/3-20, 8/3-20
탄성계수	3000MPa
인장강도	90kN/m
융점	260°C

본 현장 옹벽의 뒷채움재로는 현장에서 공급되는 화강 풍화토를 사용하였는데 이는 통일분류법 상 SM으로 분류되며 A 다짐결과 최대건조단위중량 $\gamma_d = 1.88 \text{ g/cm}^3$, 최적함수비 $w_{opt} = 12.5 \%$ 로 나타났다.

3. 유한요소해석

유한요소해석 기법은 다양한 적용성과 구조물의 전체적 또는 국부적 응력-변형 관계 등 해석 대상 구조물의 역학적 거동 특성의 총체적 파악이 가능하다는 잇점이 때문에 지반공학문제에 매우 활발히 적용되고 있다. 본 연구에서는 유한요소해석과정에 대해 간략히 언급하고자 한다.

3.1 사용 프로그램

본 연구에서 수행한 유한요소해석에서는 네덜란드 TNO Building & Construction Research 社와 Delft Technical University에서 공동 개발한 DIANA를 이용하였다. DIANA는 Von-Mises, Tresca, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Egg Cam-Clay 등 다양한 구성모델의 적용이 가능하고 여러 가지 유한 요소 형태를 제공하는 범용 유한요소해석 프로그램이다.

한편, 유한요소해석에 있어서 입력자료 작성을 수작업에 의존할 경우 많은 시간과 노력이 필요하며, 특히 3차원 해석에서는 시간적 어려움 뿐만 아니라 기술적 어려움이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 유한요소망 및 입력 자료 작성의 효율성을 높이기 위해 전처리 프로그램인 FEMGEN을 사용하였으며, 해석 후 결과의 효율적인 분석을 위하여 후처리 프로그램인 FEMVIEW를 이용하여 가시화 한 후에 지반의 거동 메카니즘과 보강재의 응력-변형을 거동을 정성·정량적으로 분석하였다.

3.2 해석 모델링

본 연구에서는 현장 보강토 옹벽에 대해 2차원 평면변형률 해석을 수행하였다. 해석 모델링에서 기초 지반은 옹벽의 바닥 및 전면으로부터 벽체 높이의 2.0배에 해당하는 영역을 모델링하였으며, 뒷채움 영역은 현장 조건을 고려하여 옹벽 높이의 약 3.0배를 고려하였다(그림 3). 수직 및 수평 경계는 경계면의 연직방향 변위를 구속하는 경계조건을 부여하였다.

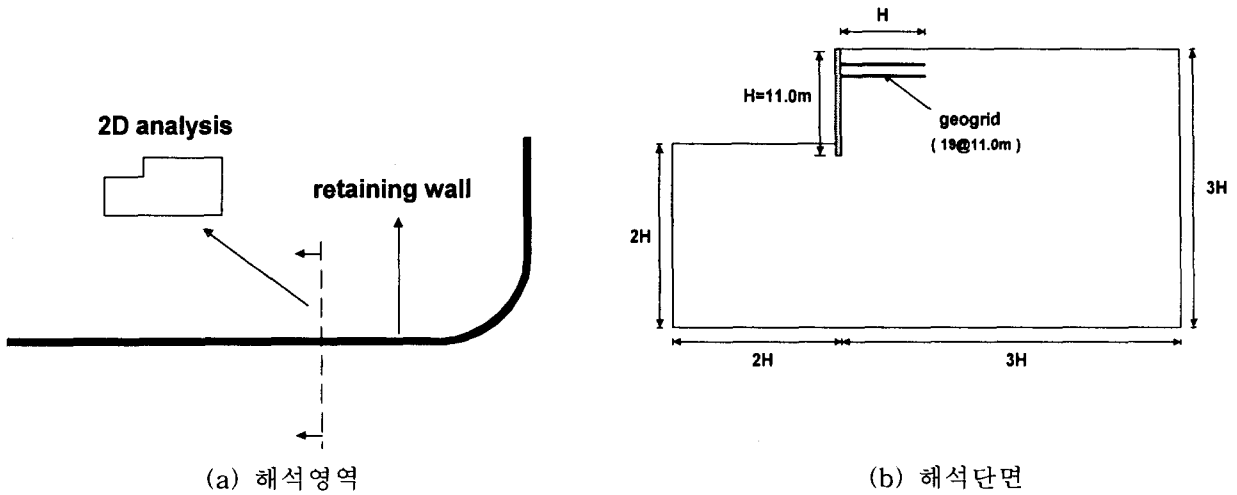


그림 3. 해석영역 및 단면의 개략도

해석영역을 이산화하는데 있어서 옹벽 블록-기초지반-뒷채움재는 2차원 해석시 3절점 혹은 4절점 평면요소를 이용하여 모델링하였다. 한편 보강재는 DIANA에서 제공하는 보강요소(Embedded Reinforcement Element)를 이용하여 모델링하였으며, 벽체와 뒷채움재 사이의 불연속면에서의 미끄러짐 거동은 Goodman Type의 상호면요소(Interface Element)를 이용하여 모델링하였다. 예비해석 결과 뒷채움재와 보강재 사이의 상호면 요소의 적용 여부는 해석 결과에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 상호면 요소의 적용을 생략 하였다. 그림 4는 본 해석에서 적용된 2차원 및 3차원 유한요소망을 보여주고 있다.

한편 기초 지반과 뒷채움재는 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 탄소성 재료로 간주하였으며, 지오그리드는 탄성재료로 모델링 하였다. 본 해석에 사용된 기초 지반, 옹벽 시스템 및 지오그리드의 역학적 특성이 표 2에 제시되어 있다.

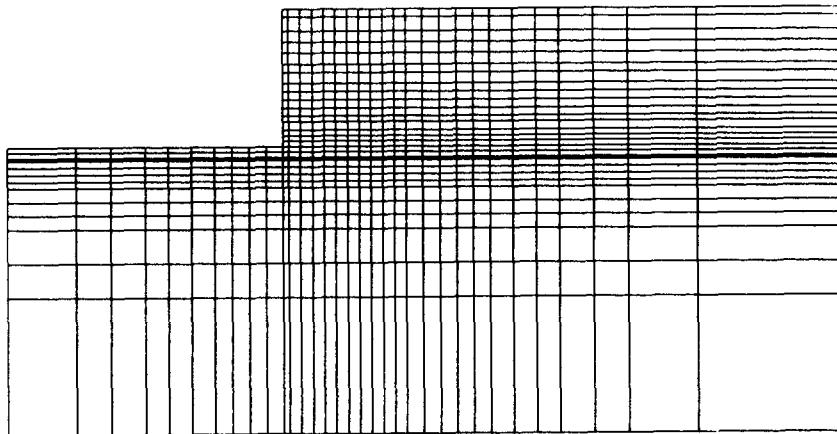


그림 4. 해석에 적용된 유한요소망

표 2. 해석에 적용된 물성치

구분	탄성계수 (kPa)	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	포아송비	연직강성 (kPa)	전단강성 (kPa)
지반	1000000	23	200	30	0.25	N/A	N/A
	10000000	25	300	30	0.23	N/A	N/A
뒷채움	30000	19	1	30	0.3	N/A	N/A
블록	8000000	25	N/A	N/A	0.23	N/A	N/A
지오그리드	3000000	1	N/A	N/A	0.25	N/A	N/A
상호면요소	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	8000000	500

본 해석에서는 현장에서 이루어지는 단계별 시공과정을 모사하기 위해 단계별 해석을 수행하였다. 즉 각 단계에서의 뒷채움층 다짐 두께와 전면 블록 두께를 고려하여 유한요소망을 작성하고 해당 뒷채움 및 보강재 포설 단계에서 이에 상응하는 요소를 해석 과정에 포함시키는 방법으로 시공과정을 모사하였다. 그림 5와 그림 6은 본 해석에서 적용된 단계별 해석 과정의 흐름도와 상호면요소 적용부의 상세도를 나타내고 있다.

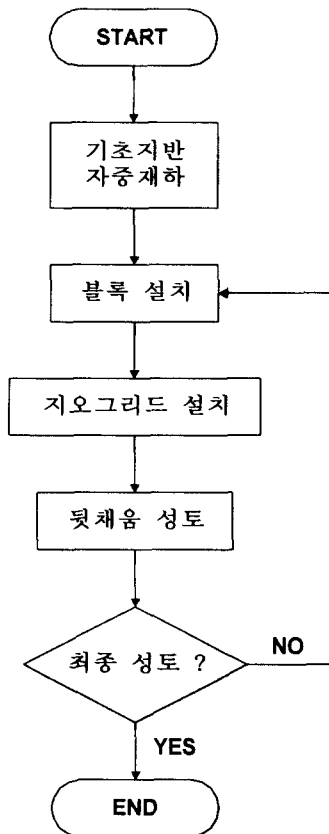
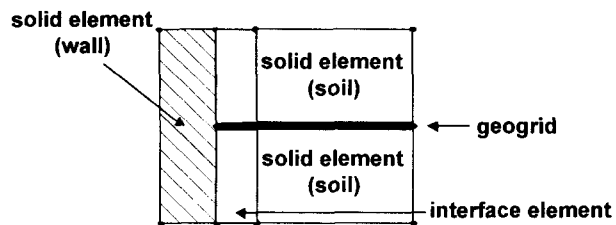
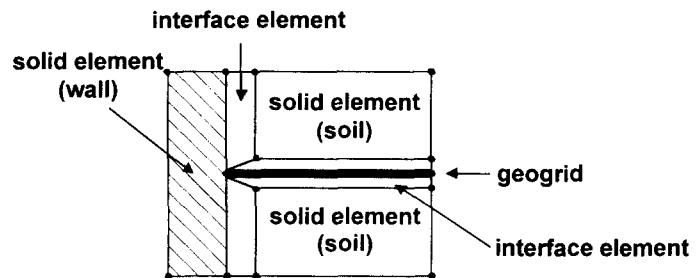


그림 5. 해석과정 흐름도



(a) without interface element
(벽체-뒷채움 적용)



(b) with interface element
(벽체-뒷채움, 보강재-뒷채움재 적용)

그림 6. 상호면요소 적용의 상세도

4. 결과 분석

4.1 벽체 변위 및 배면 토압

그림 7에서는 해석결과를 이용하여 분석한 보강토 벽체의 변위 발생 경향을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 본 현장 옹벽의 경우 벽체의 최대 수평 변위가 벽체 높이의 약 0.2%($\delta_H/H=0.002$) 정도로 나타났으며, 최대 수평 변위는 벽체 하단부에서 벽체 높이의 2/3되는 지점에서 발생하는 경향을 관찰할 수 있다. 또한 상호면 요소를 적용한 경우에 있어서 벽체의 변위 발생 경향이 보다 현실적으로 나타나고 있음을 알 수 있고 현저히 큰 변위가 발생하는 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 보강토 옹벽의 유한요소해석 모델링시에는 벽체와 뒷채움재의 상호작용을 모사하기 위해 상호면 요소가 반드시 적용되어야함을 알 수 있다. 한편, 그림 8에서는 본 현장 옹벽에 대해 보강 패턴에 따른 벽체 변위 발생 경향을 비교하고 있는데, 하단부 보강층을 제거한 Case 2 및 3의 경우에서 관찰할 수 있는 바와 같이 벽체 하단부의 보강 여부는 전반적으로 옹벽의 역학적 거동에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 반면, 상층부 보강층 수를 줄인 경우(Case 4)에는 벽체의 변위가 매우 증가하는 경향을 보이고 있어 상부 보강재의 영향이 보강토 옹벽의 거동에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

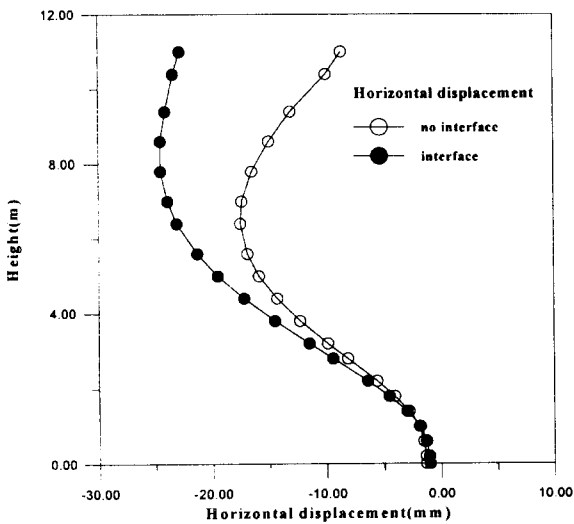


그림 7. 직선부 변위 발생 경향

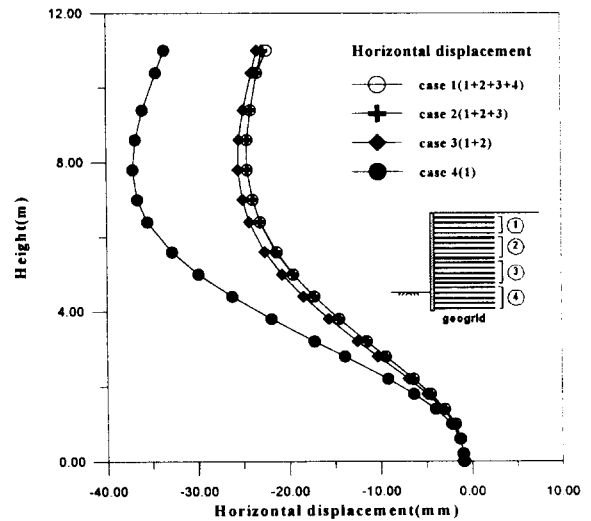


그림 8. 보강 패턴에 따른 변위 발생 경향

보강재의 강성에 따른 벽체 변위에 대한 매개변수 연구결과가 그림 9에 나타나 있다. 본 연구에서는 보강재의 강성을 $J=500\sim 60000$ kN/m 변화시키며 보강재의 강성과 벽체의 수평 변위와의 정량적 관계를 분석하였다. 그림 9에서 보이는 바와 같이 보강재의 강성이 증가할수록 변위가 현저히 감소하는 경향을 관찰할 수 있으나, 일정 크기의 강성 이상에서는 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이러한 결과는 주어진 조건에 대한 임계 강성이 존재한다는 것을 의미하며, 따라서 보강토 옹벽 설계시 벽체의 수평변위를 조절하기위해 보강재의 강성만을 증가시키는 것 보다는 경제성 분석을 통해 보강재의 강성 및 포설층수, 그리고 간격 등을 종합적으로 고려할 필요성이 있음을 의미한다.

그림 10은 벽체 배면에서의 토압 분포 경향을 나타내고 있는데 벽체 배면의 토압분포는 Rankine 및 Coulomb의 주동 토압 분포와 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다. 보강 패턴과 보강재의 강성에 따른 토압분포 변화 경향이 각각 그림 11과 12에 나타나 있다. 보이는 바와 같이 보강 정도에 따라 다소의 차이는 있으나 거의 유사한 토압이 발생하는 경향을 관찰할 수 있다.

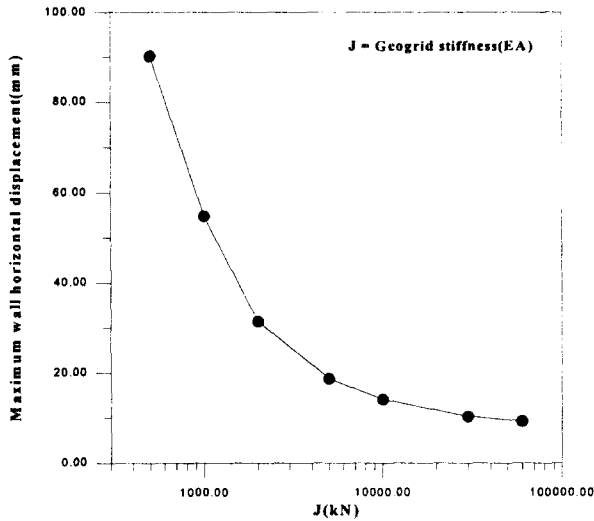


그림 9. 보강재 강성에 따른 벽체 변위 발생 경향

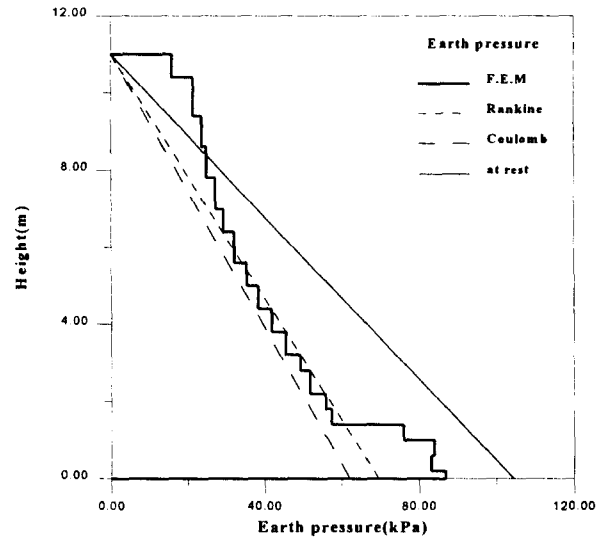


그림 10. 토압 분포 경향

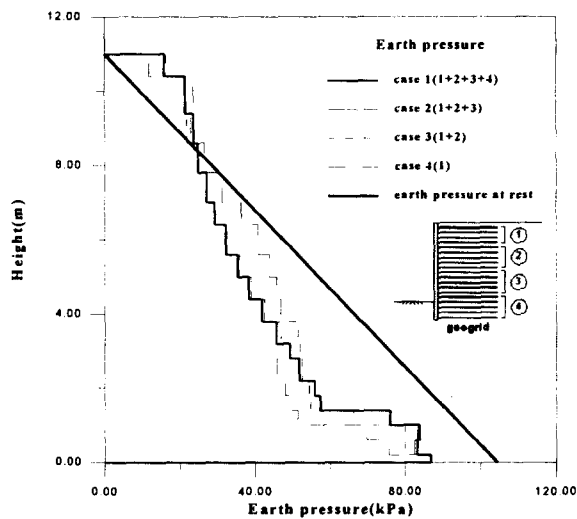


그림 11. 보강 패턴에 따른 토압 분포 경향

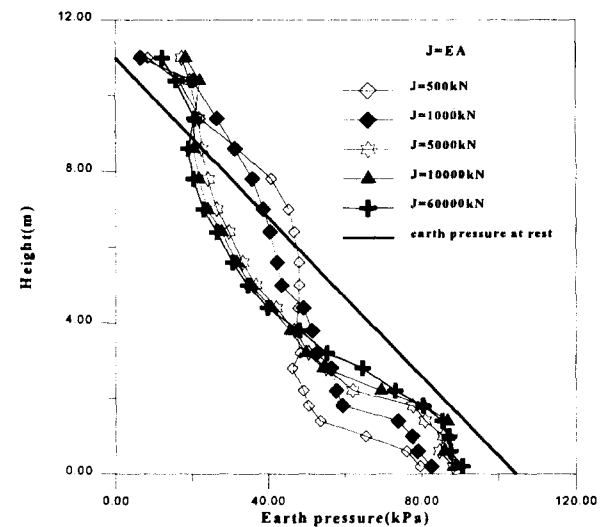


그림 12. 보강재 강성에 따른 토압 분포 경향

4.2 보강재 및 보강토체의 거동

그림 13은 2차원 해석을 수행한 직선부에서의 보강재의 인장력 발생 경향을 각 보강층에 대해 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 벽체 하단부에 포설된 보강재에서는 매우 작은 인장력이 발생하며, 상부로 갈수록 그 크기가 증가하여 최대 인장력은 벽체 최대 수평 변위가 발생하는 지점에서 발생한다. 또한 각 보강층의 인장력 분포 경향을 관찰할 경우 벽체 중간부에서는 벽체에서 다소 떨어진 지점에서 최대 인장력이 발생하나 상단부에서는 벽체 인접 지점에서 최대 인장력이 발생하는 경향을 관찰할 수 있다. 한편, 최대 인장력은 보강재의 최대 인장강도 70 kN/m를 훨씬 밑도는 약 10 kN/m 정도로 나타나 안정한 것으로 나타났다. 이러한 경향 인장력 분포 경향은 그림 14에서 나타나 있는 뒷채움지반의 최대 전단 변형률도를 이용하여 추정된 주동 파괴형태와도 일치하고 있다. 즉, 주동 파괴면은 벽체의 중하단부에서 수평면과 약 50의 각도를 이루며 형성되는 것으로 추정되는데, 이는 각 보강층의 최대 인장력 발생지점과 일치하고 있음을 알 수 있다.

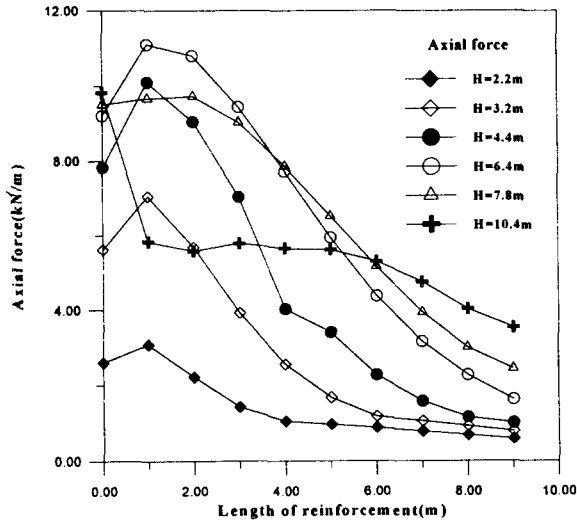


그림 13. 인장력 발생 경향

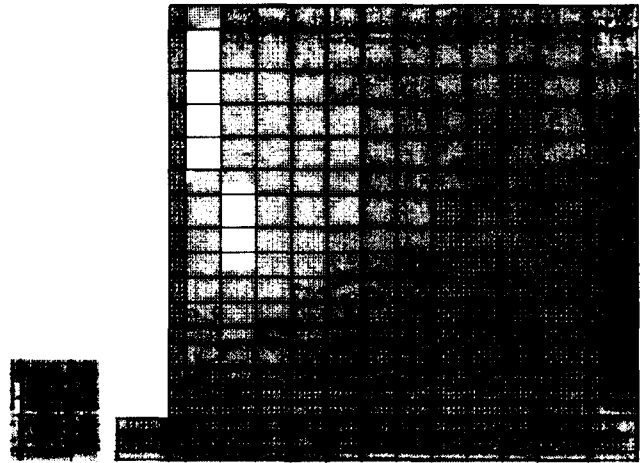
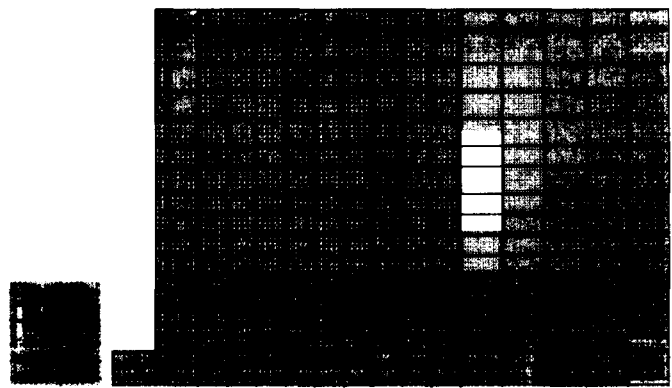


그림 14. 최대 전단 변형률도

그림 15에서는 보강재의 강성에 따른 뒷채움 지반의 최대 전단 변형률도를 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 포설된 보강재의 강성이 작을수록 보강토체 내부에서 주동파괴면이 뚜렷이 형성되는 경향을 관찰할 수 있는 반면 보강재의 강성이 증가할수록 보강토체 내부에서의 변형이 억제되고 보강영역 바깥쪽에서 국부적인 주동 파괴 영역이 형성됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 보강영역의 보강 정도가 증가함에 따라 보강토체가 하나의 블록으로 거동하는데 기인하는 것으로 판단된다.



(a) $J = 500\text{kN/m}$



(b) $J = 60000\text{kN/m}$

그림 15. 보강재 강성에 따른 최대 전단 변형률도

5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 기법을 이용하여 기 시공된 ○○ 현장의 보강토 옹벽의 거동해석 수행하였으며, 보강 패턴에 따른 벽체의 거동에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 본 연구에서 얻어진

결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 본 현장 옹벽의 경우 직선부에서는 벽체의 높이의 약 0.2% ($\delta_h/H=0.002$), 곡선부에서는 약 0.1%의 최대 수평 변위가 발생하였으며, 최대 수평변위는 벽체 저면 위로 벽체 높이의 약 2/3되는 지점에서 발생한다.
2. 보강토 옹벽의 경우 벽체 하단부에 포설된 보강재는 옹벽의 역학적 거동에 그다지 큰 영향을 미치지 않으므로 하단부의 보강도를 다소 감소시켜도 무방할 것으로 판단된다.
3. 본 현장에서 적용한 블록식 보강토 옹벽에서 상부에서는 벽체에 인접부에서 그리고 중간부에서는 벽체에서 다소 떨어진 지점에서 최대 인장력이 발생하며, 각 보강층에서의 최대 인장력 발생지점은 주동파괴면과 일치한다.
4. 보강토 옹벽 뒷채움 지반의 거동은 보강토체의 보강도에 따라 달라지며, 보강도가 증가할수록 보강토체는 하나의 블록으로 거동하여 보강영역 바깥에서 주동파괴가 발생하는 경향을 보인다.
5. 보강토 옹벽의 유한요소해석시 벽체와 뒷채움재 사이의 불연속 거동에 대한 모델링 여부가 해석 결과에 지대한 영향을 미치므로 보강토 옹벽의 정확한 거동 해석을 위해서는 상호면요소를 이용한 벽체-뒷채움재 사이의 모델링이 반드시 필요하다.

참고문헌

1. Gray, D. H and Ohashi, H. "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1983, pp. 335-353.
2. Ho, S. K. and Rowe, R.K. "Finite Element Analysis of Geosynthetics Reinforced Soil Walls", *Geosynthetics*, 1993, pp. 203-216.
3. J. G. Collin and R. R. Berg, "Permanent Geogrid Reinforced Soil Retaining Walls-US Experience" *Recent Case Histories of Permanent Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls*, 1994, pp. 61-68
4. Ho, S. K. and Rowe, R.K. "Effect of Wall Geometry on the Behavior of Reinforced Soil Walls", *Geotextiles and Geomembranes*, 1996, pp. 521-542
5. M. R. Simac, B. R. Christopher and C. Bonczkiewicz, "Instruction Field Performance of a 6m Geogrid Soil Wall" *Geotextiles and Geomembranes*, 1990, pp. 53-59