RESEARCH ARTICLE

블록식 보강토 옹벽에서 개별 블록간 거동특성을 고려한 수치해석적 연구

황성필¹ · 박병석^{1*} · 우용훈¹ · 박상기² · 김우석³

¹한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원, ²한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, ³한국건설기술연구원 건설산업진흥본부 수석연구원

Numerical Analytic Study considering the Behavior Characteristics between Individual Blocks in Block-Type Retaining Walls

Sungpil Hwang¹ · Byungsuk Park^{1*} · Yong-Hoon Woo¹ · Sangki Park² · Wooseok Kim³

¹Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, KICT ²Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, KICT ³Senior Researcher, Construction Industry Promotion Department, KICT

Abstract

Reinforced earth retaining walls have been widely used in recent years, as they are superior from the landscape perspective than normal concrete retaining walls. However, as reinforced earth retaining walls are made of various materials depending on site, existing design methods cannot secure stability, and a variety of problems have occurred. Studies on the design and stability analysis methods, which are different from existing methods, have been conducted to address these problems. This study conducted a stability investigation using numerical analysis, and blocks of reinforced earth retaining walls were individually applied, which is different from pre-existing numerical analyses. To verify the input values of the numerical analysis when applying individual blocks, real-scale experiments of the friction characteristics between the blocks and the connection properties between the blocks and stiffener were conducted. The applicability of the block conditions, which were the same as those of real sites, was verified through numerical analysis, and will be used for the stability review and design of various combinations of blocks and stiffeners.

Keywords: reinforced earth retaining walls, individual blocks, numerical analysis, various combinations of blocks and stiffener

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Byungsuk Park E-mail: parkbyungsuk@kict.re.kr

Received: 15 November, 2021 Revised: 25 November, 2021 Accepted: 25 November, 2021

C 2021 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attri-

bution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

일반 콘크리트 옹벽에 비해 경관성이 우수한 보강토 옹벽이 최근 많이 사용되고 있다. 다양한 재료와 복 잡한 현장여건으로 기존 설계 방식만으로는 안정성 확보가 어려운 경우가 발생되고 있다. 이러한 문제 를 해결하기 위해 현장여건에 적합한 안정성 분석 방법에 대한 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 기존 수치해석과는 다르게 보강토 블록이 개별거동 가능하도록 적용하였으며, 개별 블록거동에 따른 물성치 및 강도 적용을 위하여 블록간 마찰특성과 블록과 보강재의 연결특성에 관한 실규모 시험을 수행하였다. 수치해석을 통해 현장과 동일한 블록조건의 적용 가능성을 확인하였고, 이를 활용하여 다양한 조합의 블 록과 보강재의 안정성 검토 및 설계에 활용 가능 할 것으로 판단된다. 또한 외적안정의 범위를 넓혀 안 정성을 더욱 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 보강토 옹벽, 개별블록, 수치해석, 블록-보강재 조합

서론

보강토 공법은 1960년대 중반 프랑스의 H. Vidal에 의해 개발된 후 사용되는 재료들이 다양하게 개발되어 현장에 적용 되고 있으며, 국내 현장에서도 많이 사용되고 있는 공법이다. 최근에는 콘크리트 블록이 노출된 옹벽구조물의 삭막한 경 관에서 벗어나 주변 환경과 조화로운 경관을 형성할 수 있는 다양한 보강토 공법의 기술들이 개발되고 있다. 특히, 택지개 발, 공원, 관광단지, 주거지, 학교 등을 중심으로 인간의 감성을 고려한 다양한 경관옹벽 기술이 개발 및 적용되고 있다. 그 중 경관기술로는 전면에 설치되는 블록의 디자인, 블록의 형태를 변경하여 식생과 LED 조명 등이 적용된 제품들이 대표 적이라 할 수 있다(Zhao et al., 2005; Chung, 2007).

보강토 공법은 인장에 대한 저항력이 약한 흙의 역학적 단점을 보완하기 위해 흙 속에 인장력 보강재를 설치하여 보다 안정적인 흙복합체를 형성하는 공법이다. 보강토 공법은 흙 속에 인장력 보강재를 포설 후 다짐을 하는 성토보강토 공법 과 보링 후 인장력 보강재를 삽입하는 절토보강토 공법으로 크게 나눌 수 있다(Bonaparte et al., 1987).

본 논문에서는 일반적으로 많이 활용되고 있는 성토보강토 공법에 대해 기술하고자 하며, 주로 사용되는 인장력 보강재 로는 지오매트 PP(Polyester) mat, PET(Polypropylene) mat, PE(Polyethylene) 등이 있다. 이들 재료는 자외선에 의해 쉽 게 열화 될 수 있지만, 다른 요인들에 의한 열화 속도는 낮은 것으로 나타났다. 자외선이 차단되는 지중에 설치될 경우 자 외선에 의한 열화가 차단되기 때문에 내구성 및 활용성은 높은 것으로 나타났다(Im, 2010).

연약지반에 보강토 옹벽을 시공하는 경우 변위와 변형률 등 대부분이 관리기준치를 초과하는 경우가 빈번하여 거동개 선이 필요하다. 이 경우 보강재 수직설치간격을 좁게 할수록 상단 수평변위, 특히 옹벽의 높이가 증가할수록 개선효과가 크게 나타나는 것으로 확인되었다(Ki et al., 2007). 이러한 경우와 같이 보강토 옹벽의 경우 다양한 변수 조건이 안정성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

지반의 특성을 최대한 활용하는 보강토 공법의 설계는 내적안정과 외적안정을 검토하여 보강재의 길이와 간격을 결정 하게 된다. 내적안정설계에서는 보강재의 최대인장력과 포설길이를 결정하여야 한다(Das, 2007). 이때 설계의 개념은 주 동파괴면 외측의 보강재가 상하 간격에 해당되는 토압에 파단되지 않거나 인발되지 않는 설계인장강도를 갖도록 보강재 의 강도나 종류를 결정하게 된다(Das, 2010). 이후 외적안정설계를 위해 보강재로 보강된 부분을 중력식 옹벽으로 간주하 고 전도, 활동, 지지력에 대한 안정을 검토한다. 일반적으로 옹벽의 붕괴는 전도에 의해 발생하는 확률이 높으며, 전도에 대한 안정성이 부족하면 급격한 파괴에 이르기 때문에 활동보다 높은 안전율을 적용하고 있다. 이처럼 보강토 공법의 지 반 보강효과는 설계에서 반영되는 수치들 보다 클 수 있으나, 재료, 현장시공 과정 등 다양한 변수들을 고려하여 안전율을 포함하여 안전측으로 설계가 이루어지고 있다(Huang, 1997).

최근 보강토 공법에서 경관적인 부분이 강조되고 있으며, 대형블록 및 조립블록 등 다양한 종류의 블록이 개발되고 있 다. 이러한 상황을 고려하면 보강토 공법의 안전율을 유지하면서 대형블록 및 조립블록 등에 대한 보완이 이루어 져야 한 다. 이를 위해서는 보강토 공법의 보강효과를 정확하게 파악할 필요가 있다. 보강토 공법의 보강효과는 설계에서 사용되 는 계산값 보다 더 클 것이나 보강효과를 비교적 정확하게 평가할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 보강효과를 평가하기 위 해 보강토 공법의 매커니즘인 보강재와 뒤채움 흙의 관계를 파악하고자 하였다. 흙과 보강재가 상호에 미치는 영향을 파 악하기 위해서 수치해석적 기법을 활용하였다. 보강토 공법의 수치해석에서는 보강토 블록을 옹벽과 같은 하나의 구조체 로 해석을 진행해 왔으나, 본 연구에서는 블록 하나하나를 각 구조체로 해석을 수행할 수 있는 방법에 대해 고찰하였다. 이 를 위해 블록과 블록의 마찰특성 및 블록과 보강재의 마찰특성에 대한 실규모 시험을 수행하였고, 결과를 활용하여 수치

사용된 재료의 특성

본 연구에서는 경관성을 위해 LED조명 및 수목을 적용 할 수 있도록 개량된 보강토 블록을 적용하여 경관성 보강토 공 법에 대한 검토를 하고자 하였다. Fig. 1은 보강토 블록을 활용한 식생적용 조감도 및 블록의 형상, 크기에 대한 도면을 나 타내고 있다. 경관용으로 개발된 보강토 블록은 다양한 크기의 블록을 이용하여 식생적용이 가능(Fig. 1a)하며, 블록 내부 에 LED를 부착하여 다양한 색을 활용하여 활용도를 높였다. 보강재의 경우 일반적으로 많이 사용되는 보강재(지오그리 드 PET)를 사용하였다.



(a) View map of reinforced earth retaining wall

Fig. 1. Block characteristics.





본 연구에서는 보강토 옹벽 벽체의 거동특성을 확인하기 위해 벽체를 하나의 구조체로 해석하지 않고, 각각의 블록을 하나의 구조체로 모델링하여 벽체의 블록이 개별 거동하도록 하였다. 또한 일반적인 적용하는 보강토 옹벽의 물성치를 적 용하지 않고 블록과 블록의 마찰특성 및 블록과 보강재의 연결강도 시험을 수행하여 보강효과를 정확하게 파악하고자 하 였다.

Fig. 2a는 블록과 블록간 마찰특성 시험, Fig. 2b는 블록의 파괴로 인한 시험종료를 나타내고 있다. 블록과 블록간 마찰특성 시험을 위해 하부에 2개의 블록을 놓고 상부에 1개의 블록을 올려 실제 시공과 같은 구조를 만들었다. 이후 상부 블록에



(a) Front test view of friction characteristics between the blocks



(b) Test completion (failure)

Fig. 2. Test of block-block friction characteristics.

상재하중을 재하하고 하부블록은 고정한 상태에서 상부블록을 수평방향으로 하중을 재하하여 파괴시까지의 수평하중을 측정하였다. 시험결과 초기 점착력은 2.0 kN, 마찰각은 33.5°로 나타났다(Table 1, Fig. 3).

Test count –	Test inspection item		
	Vertical load (kN)	Maximum horizontal load (kN)	Maximum horizontal displacement (mm)
1	15.99	8.77	17.27
2	24.50	21.08	26.98
3	49.00	26.76	23.90
4	73.50	47.35	20.76
5	98.00	58.72	24.80

Table 1. Test of block-block friction characteristics



Fig. 3. Test of block-block friction characteristics.



(a) Front test view of connection strength between the block and stiffener

(b) Test completion (breaking)

Fig. 4. Connection strength test between the block and stiffener.

Fig. 4a는 블록과 보강재의 연결강도 시험 전경, Fig. 4b는 블록과 보강재 시험에서 파단 시를 나타내고 있다. 블록과 보 강재의 연결강도 시험을 위해 실 현장 같은 조건을 구현하였다. 하부 2개의 블록을 높고 보강재를 연결 후 상부에 1개의 블 록을 올려두고 보강재를 인발하면서 시험을 진행하였다. 시험은 보강재가 파단 될 때 까지 수행하였다. 그 결과값은 Table 2 및 Fig. 5와 같으며, 시험결과 초기 점착력은 0.4 kN, 마찰각은 19.3°로 나타났다.

Test count –	Test inspection item		
	Vertical load (kN)	Maximum horizontal load (kN)	Maximum horizontal displacement (mm)
1	12.25	3.96	87.44
2	24.50	9.29	62.59
3	36.75	12.55	84.58
4	49.00	17.57	89.57
5	61.30	20.45	87.48

Table 2. Connection strength test between the block and stiffener



Fig. 5. Connection strength test between the block and stiffener.

수치해석을 이용한 보강토공법의 거동특성 분석

본 연구에서는 보강토 공법의 거동특성을 분석하기 위하여 ITASCA사에서 개발된 OpenGL 방식의 FLAC 3D 프로그 램을 사용하였다. FLAC 3D는 유한차분법을 이용하는 프로그램으로 비선형해석도 비교적 쉽게 처리 가능하여 유체해석 및 지반분야에서 많이 사용되는 프로그램이다. 지반은 일반적으로 사용되는 Mohr-coulomb 모델을 사용하여 구현하였으 며, 블록-블록 마찰 및 블록-보강재 연결강도는 위 시험의 결과를 입력값으로 사용하였다.

해석은 옹벽의 높이를 4, 6, 8 m 3가지로 하여 보강재 길이는 0.7H, 0.5H로 4 m 옹벽은 보강재 1개, 6 m 옹벽은 보강재 2개, 8 m 옹벽은 보강재 3개를 설치하는 것으로 해석하였다. Fig. 6a는 8 m 높이의 보강토 옹벽에 3개의 보강재를 2, 4, 6 m에 설치하고 블록을 개별로 구성하여 시험결과를 적용한 모델링(이하, 개별 블록 옹벽)이다. Fig. 6b는 8 m 높이의 보강 토 옹벽에 3개의 보강재를 2, 4, 6 m에 설치하고 블록을 하나로 전체 옹벽 구조체로 구성하여 시험결과를 적용한 모델링 (이하, 단일 옹벽)이다. Fig. 6a의 모델링을 보면 옹벽 벽체가 하나가 아닌 블록별 각각 인터페이스가 나뉘어 져 있는 것을 확인할 수 있다.





(a) Individual block retaining wall modeling



Fig. 6. Reinforced earth retaining wall modeling for numerical analysis.

해석 결과는 유효응력과 변형율을 확인하였다. Fig. 7a~7f는 4 m, 6 m, 8 m의 보강토 옹벽에 0.7H만큼 보강재로 보강된 경우 개별 블록 옹벽과 단일 옹벽을 비교한 결과이다. Fig. 7의 각 수치해석 결과를 보면 보강재와 블록이 연결된 부분과 보강재 끝부분에서 유효응력이 발생되고 있는 현상을 볼 수 있다. 이는 뒤채움 부분의 토사가 유동 하는 것을 보강재가 저



(c) 6 m individual block retaining wall

Fig. 7. Numerical analysis results (effective stress).

(d) 6 m single retaining wall







항해 주고 있는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 7e와 Fig. 7f를 보면, 끝부분에서 보강재내부로 응력이 전이되고 있는 현상을 볼 수 있다. 아직 보강재 전체로 응력이 전이되기 전으로 보강재의 보강력의 여유가 남은 것으로 판단할 수 있다.

일반적으로 보강재는 0.7H로 적용을 하고 있으나 응력의 전이를 보다 명확하게 확인하기 위해 보강재를 0.5H로 적용 해 보았다. Fig. 8b의 유효응력 분포를 보면 Fig. 8a의 보강재 끝 부분에 집중된 유효응력이 보강재 전체로 전이되고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 최상부 보강재는 전체에 응력이 작용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 보강토 옹벽 배면의 유동에 의해 발생되는 인장력을 보강재가 지지하면서 안정을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다.





(b) Stiffener 0.5H



Fig. 9a~9f는 4 m, 6 m, 8 m의 보강토 옹벽에 0.7H만큼 보강재로 보강된 경우 개별 블록 옹벽과 단일 옹벽의 변형율을 비교한 결과이다. Fig. 10b는 변형율의 변화를 보다 명확하게 확인하기 위해 Fig. 10a에 적용했던 보강재 0.7H를 0.5H로 바꾸어 적용해 보았다. 각 수치해석 결과를 보면 변형의 양상을 확인 할 수 있으며, 특히, 높은 응력이 작용하여 변위가 큰 8 m의 경우 변형율이 예상 파괴면을 명확하게 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 특히, Fig. 10b의 경우 블록 뒤쪽에서 블 록과 배면토 사이의 변위와 보강재가 끝나는 부분 배면토 상부 인장균열 등이 발생하는 현상이 모사되는 것을 확인할 수

Fig. 7. Continued.

있었다. 또한, 개별 블록 옹벽으로 해석을 진행하는 경우에도 실제 시험값이 반영되어 블록에서의 파괴가 발생하거나 국 부파괴 등 실제 현상의 수치해석 적용이 가능한 것으로 파악되었다.



(e) 8 m individual block retaining wall

Fig. 9. Numerical analysis results (strain).

(f) 8 m single retaining wall



(a) Stiffener 0.7H

(b) Stiffener 0.5H



결론

일반 콘크리트 옹벽에 비해 다양한 형태로 경관성이 우수한 보강토공법이 최근 많이 적용되고 있으며, 다양한 재료와 복잡한 현장문제로 블록의 변형, 균열 및 집중호우 시 배수문제 등 문제점이 발생되고 있다. 기존의 설계방식만으로는 안 정성을 확보하기 어렵기 때문에, 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 설계 방식과는 다른 분석의 필요성이 있다고 판단 되어 개별모델에 따른 수치해석을 통한 분석을 수행하였다.

기존의 보강토 옹벽 수치해석은 대부분 전면벽체를 하나의 옹벽 구조체로 해석을 해왔다. 본 연구에서는 실규모 시험을 진행하고, 그 결과를 이용하여 보강토 블록 하나를 실제로 모델링 하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과 유효응력은 기존의 단일 옹벽 형태로 해석한 결과와 유사하게 나타났다. 특히 파괴를 유도하기 위하여 보강재를 짧게 적용하여 해석한 경우 보강토체에 발생되는 인장력을 보강재가 지지하여 안정을 유지하는 현상을 잘 묘사하는 것으로 확인되었다. 이를 적 용하면, 보강토 옹벽의 외적안정을 보다 넓은 범위에서 수행하여 안정성을 확보하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

보강토 옹벽의 파괴형상을 유추할 수 있는 변형율 결과를 분석하면, 단일 옹벽 형태의 수치해석 결과보다 개별 블록 옹 벽 형태의 수치해석 결과에서 파괴형상을 쉽게 유추 가능한 것으로 확인되었다. 특히 파괴를 유도하기 위하여 보강재를 짧게 적용한 경우 벽체의 움직임에 따른 벽체 뒷 부분 토사의 움직임, 보강재 상부에서 발생 될 수 있는 인장균열 현상이 실 제 현장과 유사한 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 보강토 블록과 보강재의 실제 시험 결과를 토대로 수치해석이 진행되어 비교적 실제 현상과 유사한 결과 를 얻을 수 있었던 것으로 판단된다. 나아가 실대규모의 보강토 옹벽 시험을 수행하고, 이를 역해석 형태로 분석하면 시험 결과의 수치해석 입력 시 입력 값에 대한 기준을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 과학기술정보통신부에서 지원받아 수행중인 "(21주요-대5-중기지원국내-기술사업화)다종 블록의 조합사 용과 LED적용으로 안정성과 경관성을 개선한 블록식 옹벽개발 및 사업화지원(2/2)" 연구과제의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Bonaparte, R., Holtz, R.D., Giroud, J.P., 1987, Soil reinforcement design using geotextiles and geogrids, Geotextile Testing and the Design Engineer, ASTM International.
- Chung, D.S., 2007, A planting study on the development of eco-friendly reinforced earth-retaining wall using planting green net, Journal of Environmental Science International, 16(9), 1099-1102 (in Korean with English abstract).
- Das, B.M., 2007, Principles of foundation engineering, 6th ed., Cengage Leaning, pp. 414-441.
- Das, B.M., 2010, Principles of geotechnical engineering, J. Ross Publishing, 666p.
- Huang, T.K., 1997, Mechanical behavior of interconnected concrete-block retaining wall, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(3), 197-203.
- Im, J.C., 2010, A guide for soil engineering, 2nd ed., CIR, pp. 350-416.
- Ki, W.S., Joo, S.W., Kim, S.H., 2007, Analysis of the behavior of reinforced earth retaining walls constructed on soft ground using the replacement method, The Journal of Engineering Geology, 17(4), 601-613 (in Korean with English abstract).
- Zhao, M., Luo, H., Zou, X., 2005, Analysis and design of light duty concrete block highway retaining wall, Central South Highway Engineering, 2005(1), 5-9, 12.