

# 석축의 설계단면에 대한 수치해석

이승현

선문대학교 건설시스템안전공학과

## A Numerical Analysis on Designed Drystone Masonry Wall

Seung-Hyun Lee

Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

**요약** 석축은 여전히 많이 쓰이는 옹벽의 한 종류이나 현재까지 석축의 거동과 관련하여 여전히 불확실한 부분이 있는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 분리형 석재블록으로 구성되는 석축의 설계법을 살펴보고 수치해석을 수행함으로써 석축의 거동에 대한 이해의 폭을 넓히고자 하였다. 석축의 설계결과에 따르면 석축의 설치 폭 결정시 전도를 고려하여 결정된 설치 폭이 활동을 고려하여 결정된 설치 폭 보다 큼을 알 수 있었다. 석축의 설치 폭 결정을 위해 고려하는 두 가지 전도 유형 중 파괴썩기의 경사각을 고려하는 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 설계를 지배함을 알 수 있었으며 파괴썩기의 경사각이 클수록 설치 폭 또한 증가함을 알 수 있었다. 설계를 통해 결정된 석축에 대한 수치해석을 통해 얻은 응력상태와 변위를 통해 설계된 석축이 합리적인 거동을 보임을 알 수 있었다. 수치해석결과에 따르면 석축 바닥에서의 질점변위량은 접촉요소를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 더 큼을 알 수 있었다. 수치해석결과를 통해 얻은 석축바닥의 침하양상에 따르면 낮은 높이에서는 뒷부리에서의 침하량이 앞부리에서의 침하량 보다 크게 계산되다가 높이가 증가함에 따라 앞부리에서의 침하량이 뒷부리에서의 침하량보다 더 컸다. 본 연구에서 고려한 조건하에서 수치해석을 통해 얻은 석축바닥의 변위량을 허용값과 비교해 보았을 때 허용값 이내임을 알 수 있었는데 실제 설계 시 수치해석을 통해 설계결과를 검증한다면 훨씬 신뢰성 있는 설계가 가능할 것이다.

**Abstract** There are uncertainties regarding the behavior of drystone masonry walls despite the wall still being chosen as a retaining wall. In this study, an inspection of the existing design method of a wall and numerical analysis were conducted to widen the behavior of the wall. According to the design results, installation widths of stone blocks determined by considering the stability of overturning were greater than those determined by considering the stability of translation. Between the two methods of considering the stability of overturning, it could be seen that the angle of the failure wedge governed the design rather than the other method, and the installation widths of the blocks increased as the angle of the failure wedge increased. The state of stresses and displacements of the designed wall predicted by numerical analysis showed the reasonable behavior of the wall. The numerical results showed that the nodal displacements at the base of the wall for the case of considering interface elements were greater than those for the case of considering no interface elements. Numerical analysis also showed that the settlement at the heel of the wall was greater than that of the toe for the low height of the wall, but the settlement at the toe became greater than that of the heel as the wall height increased to the final level. A comparison of the displacements obtained from the numerical analyses for the assumed conditions in this study with allowable ones, all the values were less than the allowable ones, and it is expected that numerical analysis serves as a reasonable tool that can back up the design.

**Keywords** : Drystone Masonry Wall, Design, Numerical Analysis, Stability, Interface Element, Displacement

\*Corresponding Author : Seung-Hyun Lee(Sunmoon Univ.)

email: shlee02@sunmoon.ac.kr

Received February 2, 2023

Accepted April 7, 2023

Revised March 8, 2023

Published April 30, 2023

## 1. 서론

석축의 유형은 연직방향으로 각 층마다 하나의 돌들을 쌓아 만드는 유형과 하부로부터 상부로 갈수록 다수의 석재블록에 의한 설치 폭을 감소시켜 나가는 유형으로 나눌 수 있는데 전자의 경우 일반적으로 콘크리트와 일체화시키며 후자의 경우는 석재와 석재 사이를 일체화시키지 않는 경우가 많다. 석축은 역사 구조물의 보호와 환경 및 경관의 관점에서 여전히 매력적인 옹벽구조물이라 할 수 있다. 석축과 관련된 주요한 문제는 그 거동에 대한 지식이 부족한 점을 들 수 있는데 석축을 구성하는 석재블록이 분리되어 있는 경우 매 층에 대하여 안정성을 검토해야 한다는 점이 콘크리트 옹벽과 구별되는 큰 차이점이다. 석축에 대한 해석법은 크게 수치해석에 의한 방법과 해석적 방법으로 나눌 수 있는데 수치해석에 의한 방법은 다시 접촉요소(contact element)로 석축의 블록을 고려하는 방법[1-5]과 매개변수를 균질화 하는 방법[6-8]으로 나눌 수 있다. 매개변수를 균질화 하는 방법의 경우 본질적으로 불균질한 석축을 균질체로 고려하기 위한 등가탄성계수와 극한강도에 대한 연구에 초점을 맞추고 있다. 석축에 대한 국내의 연구로는 견치돌의 맞물림과 콘크리트의 강도를 고려한 석축을 사면안정의 관점에서 다룬 연구와 보강 석축에 대한 안정해석을 다룬 연구 등이 있는데 석재블록이 분리된 석축에 대한 연구자료는 거의 없다고 볼 수 있다[9-13]. 본 연구에서는 석재블록이 분리된 석축을 대상으로 안정성 검토에 바탕을 둔 설계법에 근거하여 석축단면을 설계해 보고 결정된 설계단면에 대하여 수치해석을 수행하여 설계에 영향을 미치는 인자와 석축의 거동을 고찰해 보고자 하였다.

## 2. 석축 단면설계

본 연구에서 다루고자 하는 석축은 부재 하나의 높이가 0.5 m 인 여러 석재 블록을 쌓아 벽체를 형성한 것으로 활동에 대한 안정은 매 층의 접촉면에 대하여 검토하게 된다. 석축 설계에서 고려하는 전도의 유형은 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 2가지 유형(mode)으로 나눌 수 있다.

Fig. 1(a)에 나타나 있는 전도 mode I은 석축의 한 층이 한 개의 블록으로 되어 있는 경우에 발생되며 Fig. 1(b)에 나타나 있는 전도 mode II는 석축의 모든 층 각 각이 다수의 블록으로 구성된 경우에 발생된다. 전도와

관련해서는 Fig. 1(b)에 나타나 있는 전도 mode II가 일반적이라 할 수 있으며 파괴췌기의 경사각,  $\beta$ 를 이루면서 전도가 발생된다. 석축 최상부 블록의 설치 폭은 Fig. 2로부터 활동 및 전도를 고려하여 얻을 수 있다.

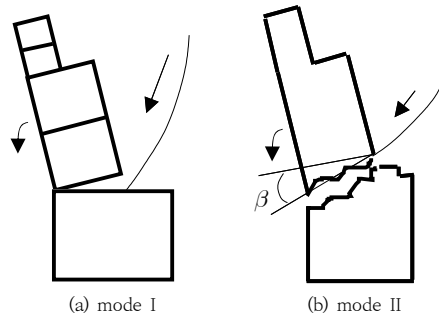


Fig. 1. Two types of failure modes due to overturning

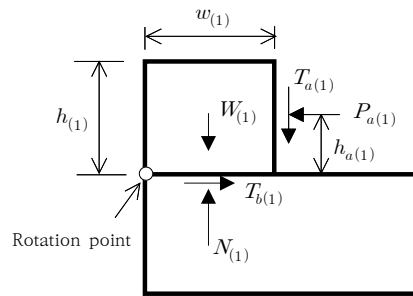


Fig. 2. Forces acting on the first row of blocks

석축 최상부의 블록 접촉면에 대한 안정성 검토는 Fig. 2를 통해 할 수 있는데  $W_{(1)}$ ,  $N_{(1)}$ ,  $T_{a(1)}$ ,  $T_{b(1)}$  그리고  $P_{a(1)}$ 은 각각 최상부 블록의 무게, 접촉면에 작용하는 수직반력, 주동전단력, 접촉면에서의 전단력 그리고 주동토압력을 의미한다. Fig. 2로부터 활동에 대한 안전율을 저항력에 대한 작용력의 비로 나타낼 수 있고 저항력은 미지수인 블록의 폭( $w(1)$ )으로 표현되므로 기준안전율을 적용하면 블록의 폭을 결정할 수 있다. 전도에 대한 안전율도 Fig. 2에 나타나 있는 회전점(rotation point)에 대한 저항모멘트와 작용모멘트의 비로서 나타낼 수 있으며 기준안전율을 적용하면 블록의 폭을 결정할 수 있게 된다. 따라서 활동과 전도를 고려하여 결정된 블록의 폭 중 큰 값이 최종적인 블록의 폭이 된다. 최상단 블록 설치 폭이 결정되었다면 석축의 상부에서부터 하부로 순차적으로 이동하면서 블록의 설치 폭을 결정할 수 있는데  $i$ 번째 행의 블록의 설치 폭이 결정되면  $(i+1)$ 번째 블록의 설치 폭은 Fig. 3을 이용하여 결정할 수 있다[14].

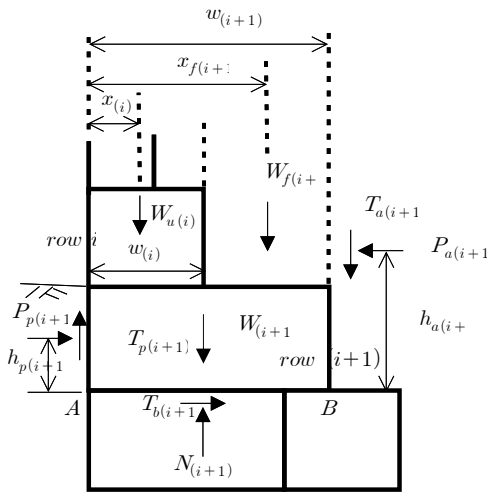


Fig. 3. Forces acting on the  $i$ th and  $(i+1)$ th blocks

Fig. 3에서  $W_{u(i)}$ ,  $W_{f(i+1)}$ ,  $T_{p(i+1)}$  그리고  $P_{p(i+1)}$ 는 각각  $i$  번째 블록 및 그 상부의 블록과 뒤채움흙 무게의 합, 폭이  $(w_{(i+1)} - w_{(i)})$ 인 뒤채움흙의 무게,  $(i+1)$  번째 블록 전면의 수동전단력 그리고  $(i+1)$  번째 블록 전면의 수동토압력을 의미한다. 또한,  $x_{(i)}$ 와  $x_{f(i+1)}$ 은 각각 석축 전면으로부터  $W_{u(i)}$ 와  $W_{f(i+1)}$ 의 작용선까지의 거리를 의미한다. Fig. 3에 대하여 활동 및 전도 mode I과 전도 mode II에 대한 안전율로부터 세 개의 블록 설치 폭을 얻을 수 있고 그 중 최대값이 최종적인 설치 폭( $w_{(i+1)}$ )이 된다. 전도 mode II에 대한 안전율로부터 얻어지는 식은  $w_{(i+1)}$ 에 대한 3차식으로 나타내는데 해석해(closed form solution)[15]또는 Newton-Raphson 방법[16]을 이용하여 해를 얻을 수 있다. 이상에서 나타난 석축의 설계법을 통해 높이 10 m인 석축을 설계해보고 각 단계 대하여 활동 및 전도에 대한 안정성 검토를 통해 결정된 석축의 설치 폭을 구해 보았는데 설계에 적용한 재료의 물성값은 Table 1과 같고 설계결과는 Fig. 4와 같다. Table 1에는 수치해석에 필요한 재료의 물성값도 함께 나타나 있는데 Table 1에서  $\gamma$ ,  $\phi$ ,  $c$ ,  $E$  그리고  $\nu$ 는 각각 단위중량, 전단저항각, 점착력, 탄성계수 그리고 포아송비를 의미한다. 석축재료로는 화강암(granite)을 고려하였는데 화강암과 화강암 사이의 접촉면에 대한 문헌에 나타나 있는 직접전단시험결과[17]에 따르면 연마한, 매끈한 접촉면에 대한 최초의 전단을 통해 측정된 전단저항각은  $15^\circ$ 와  $20^\circ$  사이의 값을 나타내었고 반복적인 전단에 의해 측정된 전단저항각은  $42^\circ$ 와  $44^\circ$ 의

값을 나타내었다. 또 다른 직접전단시험결과[18]에 따르면 화강암 접촉면의 전단저항각은  $20^\circ$  이상으로 보고되고 있고 거친 면인 경우 최대  $39^\circ$ 로 보고되고 있다. 석축의 설치 폭 결정시 전도 mode II와 관련된 파괴면의 경사각( $\beta$ )은  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  그리고  $75^\circ$ 로 가정하였다.

Table 1. Material properties for analysis

Material	Properties
Block (granite)	$\gamma_r = 26 \text{ kN/m}^3$ , $\phi_r = 40^\circ$
	$E_r = 1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ , $\nu_r = 0.2$
Backfill	$\gamma_b = 19 \text{ kN/m}^3$ , $\phi_b = 32^\circ$
	$c_b = 5 \text{ kN/m}^2$
	$E_b = 17500 \text{ kN/m}^2$ , $\nu_b = 0.3$
Foundation	$\gamma_f = 20 \text{ kN/m}^3$ , $\phi_f = 35^\circ$
	$E_f = 35000 \text{ kN/m}^2$ , $\nu_f = 0.3$

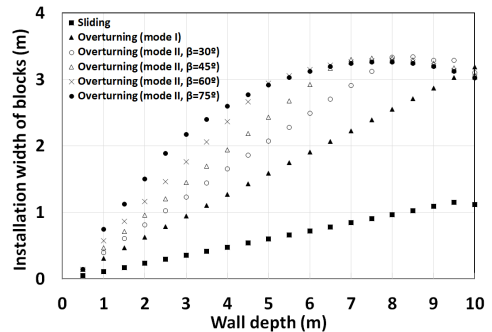


Fig. 4. Wall depth vs installation width of blocks

Fig. 4를 통해 석축의 설치 폭 결정시 전도를 고려하여 결정된 설치 폭이 활동을 고려하여 결정된 설치 폭보다 크고 전도를 고려할 경우에도 mode II를 고려한 설치 폭이 mode I을 고려한 설치 폭보다 크음을 알 수 있다. 또한, mode II를 고려할 경우 파괴면의 경사각이 클수록 설치 폭 또한 증가함을 알 수 있다.

### 3. 수치해석 및 결과의 비교

설계를 통해 결정된 높이 10 m인 석축에 대하여 수치해석을 수행하여 그 거동을 살펴보고자 하였는데 상용 유한요소해석 프로그램인 ZSOIL을 사용하였다[19]. Table 1에 나타나 있는 물성값 중에서 수치해석을 위해

추가적으로 필요한 물성값은 탄성계수와 포아송비 그리고 전단저항각이다. 화강암의 탄성정수( $E_r$ )는 실험재료 시험을 통해 구한 경우[20]를 비롯한 관련자료들[21-23]을 참고하여 결정하였다. 화강암의 포아송비( $\nu_r$ )는 미국의 AASHTO 기준[24]에 따르면 최소 0.09에서 최대 0.3의 값을 갖는데 평균값으로 0.2를 적용하였다. 뒤택흙층과 기초지반의 물성 또한 문헌자료를 참고하여 결정하였다[25,26]. 수치해석 시 석축 블록과 뒤택흙지반 및 기초지반 사이에 대하여 접촉요소(interface element)를 고려한 해석도 수행하였는데 ZSOIL에서 고려하는 수직강성(normal stiffness),  $K_n$ 과 접선강성(tangent stiffness),  $K_t$ 는 각각 Eq. (1) 및 (2)와 같이 표현된다.

$$K_n = \min\left(\frac{E_1}{h_1}, \frac{E_2}{h_2}\right) \frac{A}{\sqrt{N_{eq}}\epsilon} \quad (1)$$

$$K_t = 0.01K_n \quad (2)$$

Eq. (1)에서  $E_1$ ,  $E_2$ 는 각각 인접한 두 요소의 탄성계수를 의미하고  $h_1$ ,  $h_2$ 는 접촉면에 수직한 방향으로의 두 요소 각각의 최대 길이를 의미한다. 또한,  $A$ 는 계수로써  $10^{-4}$ 의 값을 가지며  $N_{eq}$ 와  $\epsilon$ 는 각각 계를 구성하는 방정식의 수와 정밀도를 의미한다. 수치해석은 석축의 시공순서를 모사하여 하단에서부터 상단으로 일정 높이의 석축과 뒤택흙지반을 10단계로 나누어 올라가며 계산이 진행되도록 하였다. 해석을 통해 구한, 최종 높이까지 완성된 후의 변위벡터는 Fig. 5와 같은데 Fig. 5에는 석축의 단면이 굵은 실선으로 표시되어 있다. 수치해석을 위해 석축 부분은 선형탄성재료로 모델링하였고 배면지반 및 기초지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

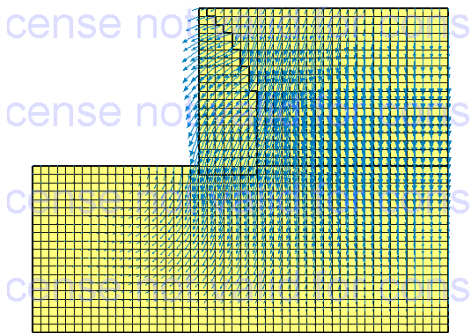


Fig. 5. Displacement vectors (w/o contact element)

Fig. 5에서 최하단 석축의 폭은 3.5 m인데 석축 앞부리에서부터 왼쪽 및 아래쪽 메쉬 경계까지의 거리는 석축 폭의 약 3배이며 오른쪽 경계까지의 거리는 약 4배이다. Fig. 5를 통해 뒤택흙 지표면에서의 변위의 크기는 상대적으로 작음을 알 수 있는데 이는 시공단계를 반영한 결과로 이해될 수 있다. 접촉요소를 고려한 경우의 변위양상 또한 Fig. 5와 유사하였다. 석축 완성후의 소성영역은 Fig. 6과 같고 벽체 바닥면의 앞부리와 중간부분(middle) 그리고 뒷부리(heel)에 해당되는 절점에 대한 연직침하량을 계산단계별로 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서 최종 시공단계에 대응하는 계산단계는 10이 된다.

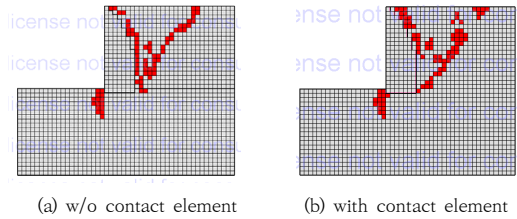
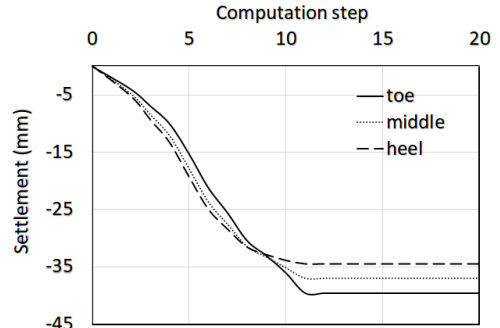
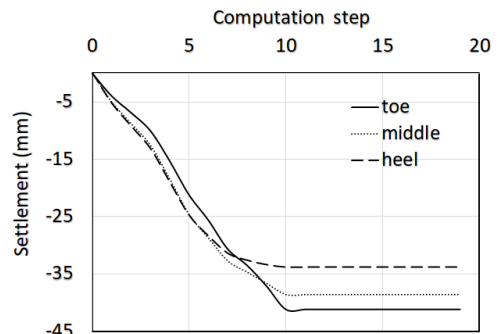


Fig. 6. Plastic zones



(a) w/o contact element



(b) with contact element

Fig. 7. Nodal settlements at the wall base

#### 4. 결론

Fig. 6을 통해 석축 배면지반 및 석축 앞부리 아래쪽 근처에 국부적인 소성영역이 형성되었음을 알 수 있다. Fig. 7을 통해서는 단계시공에 따라 초반 및 중반 시공단계에서는 석축의 뒷부리에서의 침하량이 상대적으로 약간 큰데 이러한 양상은 최종 침하량에 도달할 무렵 역전되어 석축의 앞부리-중간부분-뒷부리 순의 침하량 크기를 보임을 알 수 있다. 이러한 침하 양상은 단계시공에 따라 비교적 뒤채움지반의 높이가 낮은 경우 뒤채움 지반의 침하량이 석축의 침하량보다 크게 발생됨을 반영하며 석축의 높이가 커짐에 따라 Fig. 6에 나타나 있는 석축 앞부리 기초지반에서의 소성영역의 확대에 의해서 판단된다. 석축 앞부리에서의 계산단계별 수평변위량을 나타내면 Fig. 8과 같다.

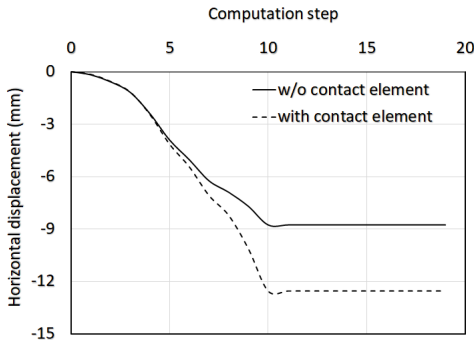


Fig. 8. Horizontal displacement at the toe

Fig. 7과 Fig. 8을 통해 접촉요소를 적용한 경우의 석축의 변위량이 접촉요소를 고려하지 않은 경우에 비하여 더 크음을 알 수 있다. Fig. 7로부터 접촉요소를 고려하지 않은 경우의 석축 앞부리와 뒷부리에서의 최종침하량은 각각 40 mm와 34 mm 이며 접촉요소를 고려한 경우의 침하량은 각각 41 mm와 34 mm이다. 해석을 통해 얻은 최대 침하량은 돌쌓기 및 벽돌에 대한 허용 최대 침하량[27]인 25~50 mm 이내임을 알 수 있다. 또한, 각변위량을 계산해 보면 접촉요소를 고려하지 않은 경우 1/583로 계산되고 접촉요소를 고려한 경우 1/500으로 계산되어 Bjerrum이 제시한 조적벽의 안전한계[28]인 1/150 보다 작음을 알 수 있다. Fig. 8에서 접촉요소를 고려하지 않은 경우의 석축 앞부리에서의 최종 수평변위량은 9 mm이며 접촉요소를 고려한 경우의 수평변위량은 13 mm이다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 석축단면의 설계결과를 통해 석축의 설치 폭 결정 시 전도를 고려하여 결정된 설치 폭이 활동을 고려하여 결정된 설치 폭 보다 크음을 알 수 있었다.
- 2) 석축의 설치 폭 결정을 위해 고려하는 두 가지 전도 유형 중 파괴췌기의 경사각을 고려하는 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 설계를 지배함을 알 수 있었으며 파괴췌기의 경사각이 클수록 설치 폭 또한 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 설계를 통해 결정된 석축단면에 대한 수치해석을 통해 얻은 응력상태와 변위거동을 통해 설계된 석축이 합리적으로 거동함을 알 수 있었다.
- 4) 수치해석결과에 따르면 석축 바닥에서의 절점변위량은 접촉요소를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 더 크음을 알 수 있었다.
- 5) 수치해석결과를 통해 석축바닥의 침하양상은 일정 높이를 기준으로 그 보다 낮은 높이에서는 뒷부리에서의 침하량이 앞부리에서의 침하량 보다 크게 계산되다가 일정 높이 이상인 경우 앞부리에서의 침하량이 뒷부리에서의 침하량보다 더 컸다.
- 6) 본 연구에서 고려한 조건하에서 수치해석을 통해 얻은 석축바닥의 변위량을 허용값과 비교하여 허용값 이내임을 알 수 있었는데 실제 설계시 수치해석을 통해 설계결과를 검증한다면 훨씬 신뢰성 있는 설계가 가능할 것이다.

#### References

- [1] Itasca, UDEC code: Vers. 4.1, Minneapolis, MN, USA: ITASCA Consulting Group, 2004.
- [2] J. G. Dickens, P. J. Walker, "Use of distinct element model to simulate behavior of dry-stone walls", *Struct. Engng. Rev.* 8, No. 2-3, pp.187-199, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0952-5807\(95\)00059-3](https://doi.org/10.1016/0952-5807(95)00059-3)
- [3] R. M. Harkness, W. Powrie, X. Zhang, K. C. Brady, M. P. O'Reilly, "Numerical modelling of full-scale tests on drystone masonry retaining walls", *Geotechnique* 50, No. 2, pp.165-179, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.2.165>
- [4] W. Powrie, R. M. Harkness, X. Zhang, D. I. Bush, "Deformation and failure modes of drystone retaining walls", *Geotechnique* 52, No. 6, pp.435-446, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.6.435>

- [5] J. Burgoyne, "Revetments of retaining walls", *Corps R. Engng Papers* 3, pp.154-159, 1853.
- [6] G. N. Pande, J. X. Liang, J. Middleton, "Equivalent elastic moduli for brick masonry", *Comput. Geotech.* 8, No. 3, pp.243-365, 1989.
- [7] de Buhan, P., de Felice, G., "A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry", *J. Mech. Phys. Solids* 45, No. 7, pp.1085-1104, 1997.
- [8] A. S. Colas, J. C. Morel, D. Garnier, "Yield design of dry-stone masonry retaining structures: comparisons with analytical, numerical, and experimental data", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 32, No. 14, pp. 1817-1833, 2008.
- [9] S. K. Kim, "Stability Analysis for Masonry Walls by Circular Arc Method", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 22, no. 1, pp.83-98, 1974.
- [10] I. J. Jeong, Y. K. Shin, C. H. Hwang, "Experimental Study on the Reinforced Earth Masonry Walls", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 23, no. 3, pp.91-104, 1975.
- [11] S. N. Kim, W. S. Yang, Y. S. Paik, "Stability Analysis of Seokchook Using the Design Method of Rockery", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, vol. 5, no. 2, pp.5-17, 1989.
- [12] H. T. Kim, I. K. Kang, "Stability Analysis and Design of Reinforced Masonry Walls", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 12, no. 2, pp.239-253, 1992.
- [13] W. S. Bae, "Evaluation on Optimal Height of the Bin Wall using Stability Analysis", *Journal of The Korean Society of Safety*, vol. 24, no. 2, pp.48-54, 2009.
- [14] L. R. Alejano, M. Veiga, J. Taboada, M. Diez-Farto, "Stability of granite drystone masonry retaining walls: I. Analytical design", *Géotechnique* 62, No. 11, pp.1013-1025, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.112>
- [15] F. W. J. Olver, D. W. Lozier, R. F. Boisvert, C. W. Clark, NIST handbook of mathematical functions. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [16] E. Kreyszig, Advanced engineering mathematics, Fifth ed., Vol.2, pp.764, 1983.
- [17] E. Z. Lajtai, A. M. Gadi, "Friction on a granite to granite interface", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 22, pp.25-49, 1989.
- [18] Ildikó Buocz, Nikoletta Rozgonyi-Boissinot, Péter Görög, Ákos Török, "Laboratory determination of direct shear strength of granitoid rocks; examples from the host rock of the nuclear waste storage facility of Bataapáti (Hungary)", *Central European Geology*, Vol. 53/4, pp.405-417, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1556/CEuGeol.53.2010.4.4>
- [19] Manuals of the software ZSOIL, Zace Services Ltd., 2013.
- [20] M. M. Sorour, M. M. Parsekian, G. A. Duchesne, D. Paquette, J. Muft, A. Jaeger, N. G. Shrive, "Evaluation of Young's modulus for stone masonry walls under compression," *11th Canadian Masonry Symposium*, Toronto, Ontario, May 31- June 3, 2009.
- [21] M. Corradi, A. Borri, A. Vignoli, "Experimental study on the determination of Strength of Masonry Walls", *Construction and Building Materials*, 17, pp.325-337, 2003.
- [22] M. Tomazevic, Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings, Imperial College Press, London, 1999.
- [23] Marlène C. Villeneuve, Michael J. Heap, Alexandra R. L. Kushnir, Tao Qin, Patrick Baud, Guanglei Zhou, Tao Xu, "Estimating in situ rock mass strength and elastic modulus of granite from the Soultz-sous-Forêts geothermal reservoir (France)", *Geothermal Energy* vol. 6, Article number: 11, 2018.
- [24] American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Highway Bridges, 14th ed., AASHTO, Washington DC, USA, 1989.
- [25] Korea Expressway Corporation, Know-how of road design, Vol. 2, pp.41, 2001.
- [26] J. E. Bowles, Foundation analysis and design, McGraw-Hill, Inc., pp.141, 1988.
- [27] KGS, Design criteria of foundation of structure, 2002.
- [28] L. Bjerrum, "Allowable settlement of structures", *Proc., 3rd European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, Weisbaden, Germany, pp.135~137, 1963.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 2000년 2월 : 현대건설기술연구소 선임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건설시스템안전공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학