

석축의 설계높이에 대한 해석적 연구

이승현

선문대학교 건설시스템안전공학과

Analytical Study on Design Height of Stone Walls

Seung-Hyun Lee

Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

요약 본 연구에서는 기존의 석축 설계방법을 살펴보고 전형적인 뒤채움 기반조건 및 일반적인 석축의 물성조건하에서 석축의 경사각과 폭에 따른 석축 한계높이의 변화양상을 해석적으로 고찰해보고 그로부터 석축의 설계높이를 결정함에 있어 필요한 조건들에 대하여 살펴보고자 하였다. 일체형 석축에 대하여 벽체의 경사각에 따른 한계높이의 해석결과에 따르면 고전적 방법에 의한 한계높이가 면압응력에 대한 한계높이 보다 크게 계산되었다. 계산된 한계높이 각각에 대하여 구한 활동에 대한 안전율은 석축의 폭과 무관함을 알 수 있었다. 해석결과에 따르면 일체형 석축의 경우 석축의 경사각이 작을수록 활동에 대한 안전율은 감소되었는데 이는 석축의 경사각이 작을수록 한계높이가 증가됨으로 인해 토압이 증가되었기 때문임을 알 수 있었다. 조적식 석축에 대한 한계높이의 경사각에 따른 변화양상 또한 일체형 석축과 유사한 경향을 보였는데 Gifford and Kirkland 방법에 의한 한계높이의 변화폭이 Gray and Sotir 방법에 의한 변화폭보다 더 큼을 알 수 있었다. 조적식 석축에 대하여 계산된 한계높이 각각에 대하여 얻어진 활동에 대한 안전율 또한 일체형 석축에서와 마찬가지로 석축의 폭과 무관함을 알 수 있었다. 일체형 석축 및 조적식 석축에 대하여 경사각에 따라 계산된 활동에 대한 안전율이 기준안전율인 1.5를 하회하는 경우가 많아서 석축의 설계시 활동에 대한 검토가 필요함을 알 수 있었다. 조적식 석축의 설계에 있어 FHWA 가이드라인이 제시하고 있는 무보강 조적식 석축의 최대높이인 3.7 m를 설계높이의 상한값으로 고려하는 것도 설계높이를 결정하는데 있어 하나의 기준이 될 것이다.

Abstract In this study, existing design methods of stone walls were surveyed. A pattern of change in critical heights was investigated analytically with varying inclination angles of a stone wall under typical backfill conditions. The general physical properties of the wall and requirements for determining design heights of stone walls were also examined. According to the results, critical heights obtained by a classic method were greater than those obtained by a concrete block wall method. It could be seen that factors of safety against translation do not consider the widths of the walls of critical heights. Analysis results showed that factors of safety against translation decreased as the inclination angle of the wall decreased, and it could be seen that these results were explained by the increase in critical height with the increase in the inclination angle of the wall. According to the analysis results, a pattern of change in critical heights with the inclination angle of a segmental stone wall was similar to that of monolithic wall, and the range of change in critical heights by the Gifford and Kirkland method was greater than that by the Gray and Sotir method. It could also be seen that factors of safety against translation for the critical heights of the segmental walls did not consider the widths of the walls. Analysis results showed that in many cases, factors of safety against translation were less than 1.5, and it could be concluded that checking for safety against translation was necessary in the design of the stone walls. Furthermore, the critical height of 3.7 m suggested by the FHWA would be helpful in the design of segmental stone walls.

Keywords : Stone Wall, Critical Height, Inclination Angle, Monolithic, Safety against Translation, Segmental

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

email: shlee02@sunmoon.ac.kr

Received January 17, 2023

Accepted March 3, 2023

Revised February 9, 2023

Published March 31, 2023

1. 서론

최근 들어 역사 구조물의 보호와 환경적 영향 및 경관의 관점에서 석축에 대한 관심이 증대되고 있으나 석축과 관련된 주요한 문제는 그 거동에 대한 지식이 부족한 점을 들 수 있다. 석축(stone wall)은 토류구조물(earth retaining structure) 또는 벽체 앞부리 아래쪽 기초지반과 사면의 침식 보호 목적으로 적용되는데 석축을 구성하는 재료는 암석블록과 콘크리트, 잡석 그리고 필터재로 나눌 수 있다. 석축의 단면은 Fig. 1과 같이 두 가지 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 다루는 석축의 단면은 석축을 구성하는 각 단의 석재가 한 개의 석재만으로 구성된 단면임을 유의할 필요가 있다.

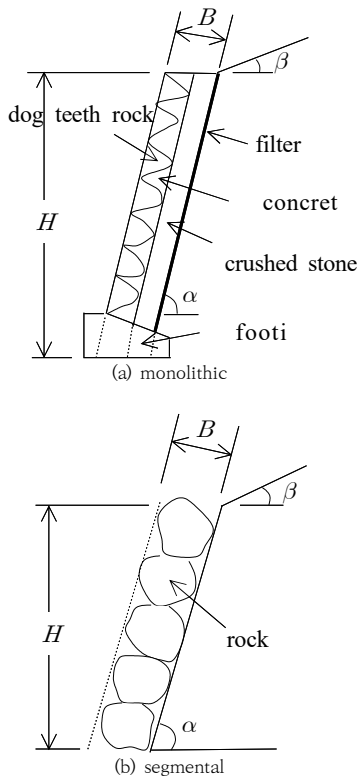


Fig. 1. Types of stone walls

Fig. 1(a)는 석축을 구성하는 견치돌(dog teeth rock)과 잡석 그리고 콘크리트가 일체로 되어 있는 형식인데 국내에서 많이 적용된 형식이라 할 수 있다. Fig. 1(b)에 나타나 있는 석축은 석축을 구성하는 암석블록과 잡석을 콘크리트 등으로 결합시키지 않은 형식으로서 미국에서는 'rockery' 라 부른다. 편의상 Fig. 1(a)와 Fig.

1(b)를 각각 일체형 석축(monolithic stone wall)과 조각식 석축(segmental stone wall)이라 명명한다. 석축의 두께(B)는 대체로 50~100cm의 크기를 갖는다. 석축의 경우 연직인 경우에 비하여 경사진 경우 좀 더 안정적이지만 공간적 문제와 기초저면을 통해 횡방향 토압을 기초지반으로 전달시키는 데 있어서의 어려움으로 인해 벽체의 경사는 제한될 수밖에 없다[1]. 석축과 유사한 벽체인 콘크리트 구유옹벽(crib wall)의 경우 최적의 벽체 경사각(α)은 78~80° 사이로 알려져 있다[2]. 석축에 대한 국내의 연구로는 견치돌의 맞물림과 콘크리트의 강도를 고려한 석축을 사면안정의 관점에서 다룬 연구와 보강 석축에 대한 안정해석을 다룬 연구 등이 있는데 기존의 석축 설계방식에 대한 고찰은 미흡하다 할 수 있다 [3-6]. 본 연구에서는 기존의 석축 설계방법을 살펴보고 전형적인 뒤채움 지반조건 및 일반적인 석축의 물성조건 하에서 석축의 경사각과 폭에 따른 석축의 한계높이의 변화양상을 해석적으로 살펴보고 그로부터 석축의 설계 높이를 결정함에 있어 고려해야 하는 조건들에 대하여 살펴보고자 하였다.

2. 석축 설계법

2.1 일체형 석축의 설계법

2.1.1 고전적 방법

고전적인 석축의 안정해석법은 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 석축의 구체 전체를 일체로 보고 전도가 발생되지 않도록 하기 위해 석축에 작용하는 합력의 작용점이 석축 바닥면의 중앙 3분권 이내에 들도록 설계하는 방법이다[7].

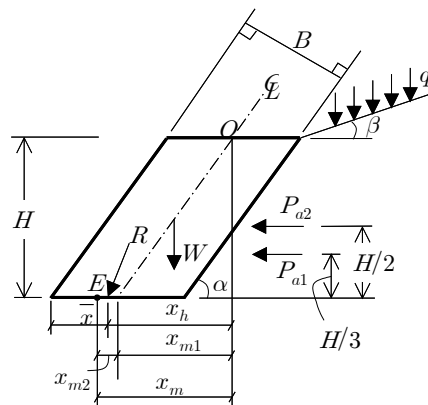


Fig. 2. Schematic diagram of classical method

Fig. 2에서 점 E 는 벽체 바닥 중앙 3분권 끝점을 나타내는데 그림으로부터 Eq. (1)이 성립됨을 알 수 있다.

$$x_m = x_{m_1} + x_{m_2} = H \cot \alpha + \frac{B_{cs} c \alpha}{6} \quad (1)$$

옹벽 앞부리에 대한 모멘트 평형을 적용하여 벽체 바닥에 작용하는 합력의 작용점 위치(\bar{x})를 얻을 수 있으므로 그림으로부터 x_h 를 Eq. (2)와 같이 얻을 수 있다. Eq. (2)에서 γ_s 와 γ_R 그리고 K_{AC} 는 각각 석축 배면지반의 단위중량, 석축의 단위중량 그리고 쿨롱 주동토압계수를 의미한다.

$$x_h = \frac{\gamma_s K_{AC}}{6 \gamma_R B_{cs} c \alpha} H^2 + \left[\frac{q K_{AC} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)}}{2 \gamma_R B_{cs} c \alpha} + \frac{\cot \alpha}{2} \right] H \quad (2)$$

Eq. (1), (2)로부터 석축의 안정조건은 $x_h \leq x_m$ 가 된다. 석축의 안정조건을 만족시키는 범위내에서 최대로 쌓을 수 있는 높이를 한계고(H_c)라 하는데 $x_m = x_h$ 를 만족시키는 높이를 말하며 Eq. (3)과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma_s K_{AC}}{6 \gamma_R B_{cs} c \alpha} H_c^2 \\ & + \frac{q K_{AC} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} - \gamma_R B_{cs} c \cot \alpha}{2 \gamma_R B_{cs} c \alpha} H_c \\ & - \frac{B_{cs} c \alpha}{6} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 H_c 는 Fig. 2에서 벽체정부 O 점에서의 깊이로 정의된다.

2.1.2 면압옹벽법

면압옹벽법은 고전적방법과 유사한 방법으로서 콘크리트 블록 옹벽(concrete block wall)으로도 불리우는데 Fig. 2로부터 $x_{m1} = x_h$ 를 만족시키는 한계높이를 결정하는 방법이라 할 수 있다. 이 방법에 의한 벽체의 한계높이는 Eq. (4)와 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$H_c = \frac{3 \left(\gamma_R B_{cs} c \cot \alpha - q K_{AC} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} \right)}{\gamma_s K_{AC}} \quad (4)$$

2.2 조적식 석축의 설계법

2.2.1 Gifford and Kirkland 방법[8]

조적식 석축은 주로 미적인 목적이나 지반의 침식 방지용으로 사용되는데 조적식 석축의 단점은 그것이 구조적으로 서로 결합되어 있는 것이 아니기 때문에 변위에 약하다는 것이다. 따라서 침하가 발생할 경우 블록 사이의 접촉에 문제가 생겨 배부름(bulging)이나 전도(toppling)가 발생할 수 있다. Gifford and Kirkland 방법에서는 전도방지 관점에서 조적식 석축의 안정성을 고려하기 때문에 석축의 안정성은 석축의 기울기에 큰 영향을 받게 된다. 그들은 전도에 대한 안정성에 근거하여 Eq. (5)와 같이 벽체의 바닥쪽에 대한 한계높이를 제안하였다. 여기서 ‘한계’란 의미는 논란의 여지가 있지만 전도가 임박했다는 의미로서 안전율 1에 대응하는 높이를 의미한다고 볼 수 있다. Eq. (5)에서 ϕ 는 석축 배면지반의 내부마찰각을 의미한다. 토압계수 K_{AC} 는 Eq. (6)과 같다.

$$\frac{H_c}{B} = \frac{0.5 \gamma_R \cos \alpha}{\sin^2 \alpha} + \frac{1}{4} \gamma_s K_{AC} \sin \phi \quad (5)$$

$$K_{AC} = \frac{\frac{c \cot \alpha \sin(\alpha/2 - \phi/2)}{\sin(\alpha/2 + \phi/2)}}{\sin(\phi + \alpha) \cot(\alpha/2 - \phi/2) - \cos(\phi + \alpha)} \quad (6)$$

Gifford and Kirkland가 관찰한 벽체의 경사각은 대부분 $72 \sim 85^\circ$ 였는데 일반적인 원지반흙의 내부마찰각에 대하여 이론적인 벽체의 최대높이는 $3.7 \sim 11$ m 라고 결론지었다. 그러나 그들이 관찰한 대부분의 벽체 파괴는 실제적으로 벽체 높이가 4.6 m를 초과한 경우에 발생되었으므로 실제적으로 4.6 m 높이를 최대 높이로 볼 수 있다.

2.2.2 Gray and Sotir 방법[9]

Gray and Sotir는 전형적인 조적식 석축의 높이를 3 m 이하로 보았으며 석축의 주된 역할은 사면의 선단(toe)부분을 보호하고 침식에 의한 사면의 피해를 방지함이라 하였다. Gray and Sotir는 석축의 안정성이 벽체의 경사와 H_c/B 에 의해 지배된다고 보았는데 전형적인 H_c/B 값이 3 을 초과하지 않는다고 보았다. Gray and Sotir는 Eq. (7)과 같이 석축의 안정성 평가식을 제안하였는데 이 또한 석축의 안정성이 전도에 의해 지배된다

는데 근거하고 있다. Eq. (7)에서 b 는 Eq. (8)과 같이 표현되며 Eq. (7)에서 FS_{OT} 와 K_{AC} 는 각각 전도에 대한 안전율과 쿨롱 주동토압계수를 의미한다.

$$\frac{H_c}{B} = \frac{0.5b + \sqrt{\frac{b^2}{4} + \frac{0.33(FS_{OT})\gamma_s\gamma_R K_{AC}\cos\phi}{\sin\alpha}}}{\frac{0.33(FS_{OT})\gamma_s K_{AC}\cos\phi}{\sin\alpha}} \quad (7)$$

$$b = \frac{\gamma_R \cos\alpha}{\sin^2\alpha} + (FS_{OT})K_{AC}\gamma_s \sin\phi \quad (8)$$

Eq. (7)은 각진 블록을 가정하고 있으며 뒤채움흙의 점착력을 무시하고 있어 경우에 따라서는 보수적일 수 있다. 또한 주동토압계수 K_{AC} 를 통해 배면 지반의 경사를 고려할 수 있다. Gray and Sotir는 경험칙(rule of thumb)으로서 벽체의 경사각은 72° 이하가 되도록 하고 배면 지표면의 최대 경사각(β)은 26° 로 설계하도록 제안하고 있다.

2.2.3 FHWA 가이드라인[10]

미국의 FHWA(Federal Highway Administration)의 석축에 대한 가이드라인(FHWA, 2006)에 따르면 조적식 석축은 높이 4.6 m까지의 사면의 지지에 적용될 수 있는데 반해 무보강 조적식 석축의 최대 설치 높이는 3.7 m로 제한된다고 되어 있다. 석축의 설계시 석축의 앞부리 아래 지반의 수동저항은 무시하도록 하고 있으며 석축의 안정성 검토를 위한 기준안전율은 활동, 전도 그리고 지지력에 대하여 각각 1.5, 2.0 그리고 3.0을 명시하고 있다. 또한 암석블록의 규격은 CalTrans[11]에 나타나 있는 재료와 설치방법에 부합되도록 해야 하며 각진 재료로서 내구성이 크고 파쇄가 없는 것이어야 한다고 되어 있다.

3. 석축의 설계높이

3.1 설계변수의 선정

석축의 설계높이 산정을 위해 적용한 설계변수는 Table 1에 나타나 있다. Table 1에 나타나 있는 흙과 석축의 물성값은 기존의 문헌에 나타나 있는 일반적인 값을 참고하여 결정하였다.

Table 1. Design properties

Monolithic wall	Segmental wall
$\alpha = 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 90^\circ$	
$B = 0.6m, 0.8m, 1.0m$	
$\beta = 0^\circ, q = 0, \gamma_s = 18.6kN/m^3$	
$\phi = 30^\circ, \delta = 2/3\phi$	
$\gamma_R = 25kN/m^3$	$\gamma_R = 23.5kN/m^3$

3.2 일체형 석축의 설계 높이

Table 1에 나타난 설계값 들에 대해서 석축의 폭(B)을 달리하여 석축의 경사각(α)에 대한 한계높이(H_c)를 일체형 석축과 조적식 석축에 대하여 구해 보았는데 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 범례에서 C1과 C2는 각각 고전적방법과 면압옹벽법을 의미한다.

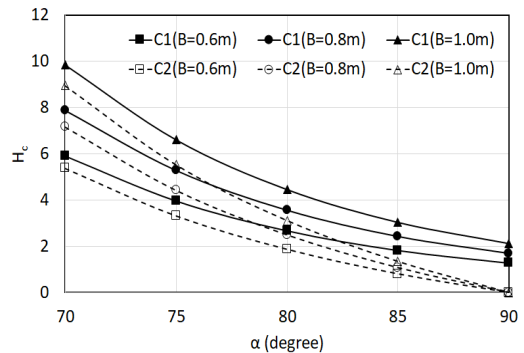


Fig. 3. Critical height(H_c) vs inclination angle(α)

Fig. 3을 통해 알 수 있는 바와 같이 고전적방법에 의한 한계높이가 면압옹벽에 대한 한계높이에 비해 상대적으로 큼을 알 수 있다. 면압옹벽에 있어 석축의 경사가 90° 인 경우 상대높이가 0인 이유는 면압옹벽의 경우 합력의 작용점이 석축 바닥의 중앙에 놓이도록 하고 있으나 토압의 작용으로 인해 합력의 작용점이 바닥의 중앙에 위치하기는 불가능하기 때문이다. Fig. 3에 나타나 있는 한계높이에 대하여 활동에 대한 안전율(FS_T)을 구해 보았는데 Fig. 4와 같다. 활동에 대한 안전율 계산시에는 석축의 근입에 따른 수동저항력을 고려하지 않았고 석축바닥과 기초지반 사이의 마찰각은 20° 로 보았다.

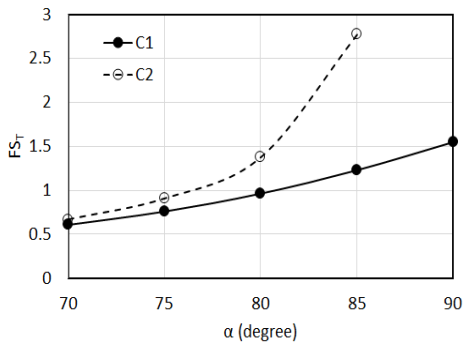


Fig. 4. Factor of safety against translation(FS_T) vs inclination angle(α)

활동에 대한 안전율 계산결과에 따르면 안전율은 석축의 폭(B)과 무관함을 알 수 있었는데 이는 석축의 폭이 커질수록 한계높이 또한 커서 석축의 무게 또한 크게 계산되지만 그에 따라 토압력도 크게 계산되기 때문으로 볼 수 있다. Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 활동에 대한 안전율은 석축의 경사각이 커질수록 증가함을 알 수 있는데 이는 경사각이 커질수록 한계높이가 상대적으로 작게 계산된 결과 때문으로 볼 수 있다. 활동에 대한 기준안전율이 1.5이므로 Fig. 4가 의미하는 바는 면압옹벽법을 포함하는 고전적인 방법으로 석축을 설계하는 경우에는 활동에 대한 안전검토를 수행하여 최종적인 설계높이를 결정해야 함을 의미한다.

3.3 조적식 석축의 설계 높이

조적식 석축에 대해서도 일체형 석축에 대하여 적용하였던 설계조건과 동일한 설계조건을 적용하여 석축의 경사각에 따른 H_c/B 의 값을 구해 보았는데 그 결과는 Fig. 5와 같다.

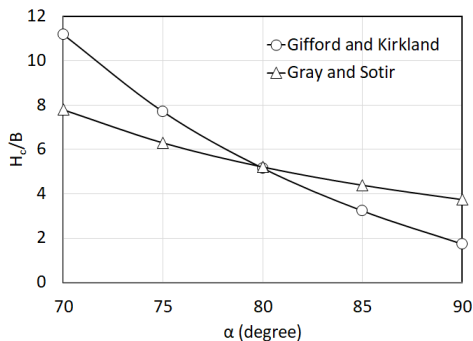


Fig. 5. H_c/B vs α

Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 석축의 경사각에 따른 한계높이는 Gifford and Kirkland 방법에 의한 값의 변화폭이 Gray and Sotir 방법에 의한 값의 변화폭보다 큰 것을 알 수 있다. 두 가지 방법에 의한 H_c/B 값은 경사각 80° 를 기준으로 역전됨을 알 수 있는데 배면지반의 내부마찰각(ϕ)이 증가할수록 두 방법에 의한 H_c/B 의 값의 상대적 크기가 역전되는 경사각은 증가하는 경향을 보였다. Fig. 5에 나타나 있는 두 가지 방법에 의한 각각의 한계높이를 적용하여 활동에 대한 안전율을 구해 보았는데 그 결과는 Fig. 6과 같다.

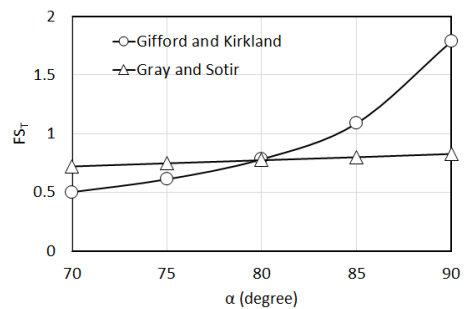


Fig. 6. FS_T vs α

일체형 석축과 마찬가지로 활동에 대한 안전율 계산결과에 따르면 안전율은 석축의 폭과 무관함을 알 수 있었다. Fig. 6을 통해 알 수 있듯이 계산에 적용한 모든 경사각에 대하여 Gray and Sotir 방법을 통해 구한 석축의 한계높이는 활동에 대한 안전이 만족되지 않음을 알 수 있다. Gifford and Kirkland 방법에 의한 경우 경사각 90° 에서만 활동에 대한 안전이 확보됨을 알 수 있다. 따라서 일체형 석축과 마찬가지로 조적식 석축에 대해서도 설계를 통해 결정된 한계높이에 대하여 활동에 대한 안전검토가 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 석축의 설계와 관련된 몇몇 연구내용을 바탕으로 계산을 통해 석축의 설계높이를 비교해 보았는데 유도된 결론은 다음과 같다.

- 1) 일체형 석축에 대하여 벽체의 경사각에 따른 한계높이의 해석결과에 따르면 고전적방법에 의한 한계높이가 면압옹벽에 대한 한계높이 보다 크게 계

산되었다. 계산된 한계높이 각각에 대하여 활동에 대한 안전율을 구해보았는데 활동에 대한 안전율은 석축의 폭과 무관함을 알 수 있었다.

- 2) 해석결과에 따르면 일체형 석축의 경우 석축의 경사각이 작을수록 활동에 대한 안전율은 감소되었는데 이는 석축의 경사각이 작을수록 한계높이가 증가되어 토압이 커졌기 때문이다.
- 3) 조적식 석축에 대한 한계높이의 경사각에 따른 변화양상 또한 일체형 석축과 유사한 경향을 보였는데 Gifford and Kirkland 방법에 의한 한계높이의 변화폭이 Gray and Sotir 방법에 의한 변화폭보다 더 큼을 알 수 있었다.
- 4) 조적식 석축에 대하여 계산된 한계높이 각각에 대하여 활동에 대한 안전율을 구해보았는데 활동에 대한 안전율은 일체형 석축에서와 마찬가지로 석축의 폭과 무관함을 알 수 있었다.
- 5) 일체형 석축 및 조적식 석축에 대하여 경사각에 따라 계산된 활동에 대한 안전율이 기준안전율, 1.5를 하회하는 경우가 많아서 석축의 설계시 활동에 대한 검토가 필수적임을 알 수 있었다.
- 6) 조적식 석축의 설계에 있어 FHWA 가이드라인이 제시하고 있는 무보강 조적식 석축의 최대높이인 3.7 m를 설계높이의 상한값으로 고려하는 것도 설계높이를 결정하는데 있어 하나의 기준이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] M. S. Acharya, "Analytical Approach to Design Vegetative Crib Walls," *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, pp.483-496, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0342-5>
- [2] H. Brandl, *Tragverhalten und Dimensionierung von Raumgitterstützmauern(Krainerwänden)*-Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung Heft141, Vienna, Austria, pp.115-220, 1980.
- [3] 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.
- [4] I. J. Jeong, Y. K. Shin, and 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.
- [5] S. N. Kim, W. S. Yang, and 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. B. Gifford and T. E. Kirkland, "Uses and Abuses of Rockeries," *16th Symposium on Engineering Geology and Soils Engineering*, Boise, Idaho, pp.55-68, 1978.
- [9] D. H. Gray and R. B. Sotir, *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization*. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [10] FHWA, *Rockery Design and Construction Guidelines*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, pp.32-37, 2006.
- [11] State of California, Department of Transportation (CalTrans), *Standard Specifications for Construction of Local Streets and Roads*. Sacramento, California, 2002.

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