

계단식 보강토옹벽의 파괴 메카니즘 연구

Failure Mechanism of Geosynthetic-Reinforced Segmental Retaining Wall in a Tiered Configuration

*1 유충식 Yoo, Chung Sik

*2 정혁상 Jung, Hyuk Sang

*3 이봉원 Lee, Bong Won

Abstract

This paper presents the results of an investigation on the failure mechanism of geosynthetic-reinforced segmental retaining walls in tiered arrangement using reduced-scale model tests. In this laboratory model tests, a reduced scale model of the full-scale geosynthetic-reinforced wall which was constructed in Geotechnical Experimental Site at Sungkyunkwan University was used to perform a study on the failure mechanism. In order to a high degree of realism, the geometry of the wall and the material properties were selected applying Similitude Laws was used to perform laboratory model tests. And contrary to the previous failure tests with various surcharge pressures, the failure by the tired wall weight was observed. Primary variables considered in the model tests include the different offset distance between the tiers and the different reinforcement length in the lower tier and as a result of the parametric study, a different failure pattern was observed.

요 지

본 연구에서는 계단식 보강토 옹벽의 파괴메카니즘 연구를 위해 모형실험을 실시한 내용을 다루었다. 보강토 옹벽의 모형실험은 성균관대학교 내의 지반시험장에 시험 시공한 계단식보강토옹벽의 원형을 축소하여 모사하였으며, 상사법칙을 이용하여 보강토옹벽에 사용된 재료의 크기 및 물성치를 원형에 가깝도록 축소하여 파괴메카니즘 분석에 신뢰성을 높였다. 또한 파괴메카니즘 분석을 위해 종전의 재하실험 방식과는 달리 자중에 의한 파괴가 가능해짐으로써 원형에 가까운 파괴 형상을 모사 할 수 있었다. 모형 실험의 내용으로는 보강토옹벽의 영향인자라고 할 수 있는 이격거리의 변화 및 보강재 길이변화에 따른 파괴 양상을 분석하였다.

Keywords : Geosynthetic-reinforced segmental retaining wall, Geogrid, Bulging, Law of similarity

1. 서 론

1960년대 말 Henry Vidal에 의해 소개된 보강토 공법은 토목섬유의 개발과 더불어 눈부시게 발전해

왔으며 많은 장점들을 지니고 있어 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 토목 구조물의 사면, 도로, 옹벽 등과 접목되 그 기능이 한층 향상되었다. 특히 수려한 외관을 자랑하는 보강토 옹벽은 주거생활 깊숙이 자리

*1 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (csyoo@skku.edu)

*2 비회원, 대정건설터트 터널설계부 사원 (yoricom@empal.com)

*3 비회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정 (lbw97@hanmail.net)

하고 있어 충분한 안정성을 필요로 하게 된다. 그러나 충분한 안정성을 확보하지 못한 보강토 옹벽의 붕괴사례(유충식 등, 2004)가 발생하고 있으며 이는 보강토 옹벽의 파괴 메커니즘에 대한 분석이 정립되지 않은데 원인이 있다고 할 수 있다. 현재 보강토 옹벽의 모형실험에 관한 연구로 Wong(1994) 등은 1.2×0.8×2m의 축소 모형 보강토 옹벽을 조성하고 47 kN/m의 강도를 지닌 polyester 보강재를 사용하여 실험을 실시하였으나, 이는 상사법칙을 적용하지 않아 원형 보강토 옹벽을 모사하는데 문제점이 있었다. 또한 Sawichki(1987)과 Porbaha(2000) 등은 축소 모형 보강토 옹벽에 하중을 가함으로써 파괴를 유도 하였으나, 이는 하중을 가하는 면에 응력이 집중현상이 발생하여 보강토 옹벽의 자체 파괴 메커니즘을 분석하는데 부족함이 있다고 할 수 있다. 성균관대학교 지반연구팀은 파괴 메커니즘 분석을 위해 상사법칙(similitude law)이 적용된 축소모형(reduced-scale model)의 자중에서의 파괴 메커니즘 실험을 실시함으로써 파괴 메커니즘 분석에 신뢰성을 높였다. 보강토 옹벽의 영향인자라고 할 수 있는 이격거리 변화, 보강재 길이변화에 따른 메커니즘 분석을 실시 모든 경우에 발생할 수 있는 파괴유형을 예측하였다. 축소 모형실험의 단면은 현행 설계법인 Federal Highway Administration (FHWA, 1997) 설계법에 근거하여 설계하여 실험을 실시하였으며 FHWA 설계법의 타당성을 분석하였다.

2. 모형 옹벽 및 실험조건

2.1 모형옹벽의 제원 및 구성요소

본 연구를 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 길이 1.8m, 높이 1.2m, 폭 0.48m의 모형 토조를 사용하였으며 전면에 투명아크릴판을 사용하였다. 또 10cm 간격의 격자판을 부착하여 붕괴상황의 비디오 자료 분석을 가능하게 하였다. 축소 보강토 옹벽 실험에 콘크리트 블록에서와 같은 전단기를 고려하기 위해 목재블록에 구멍을 뚫고 다른 블록에는 못을 박아 전단기를 모사하였다. 균질한 지반과 상대밀도의 일정한

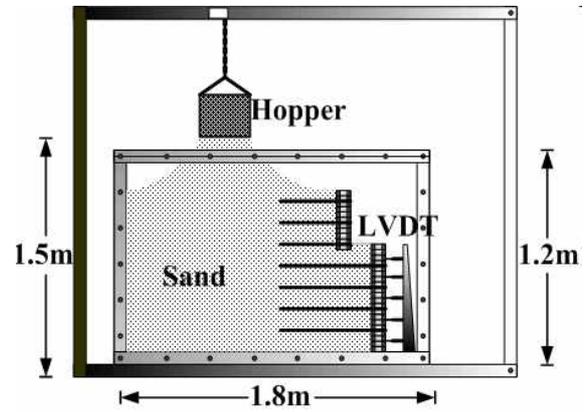


그림 1. 모형 토조 단면도

유지를 위해 강사법(Raining Technique)을 사용 하였다. 이와같은 방법은 Bieganousky와 Marcuson (1976)의 single hose rainer와 같은 개념의 hopper 하부에 모래가 균등하게 퇴적될 수 있도록 여러 겹의 체를 설치한 강사장치이다. 강사높이는 사전 예비 실험을 통하여 상대밀도 70%에 맞는 적정 높이를 산정하여 실험을 수행하였다. 보강토 옹벽의 블록은 여러 개의 콘크리트 블록을 쌓아 연속 벽체를 구현하지만, 실험에서는 평면변형으로 설정하여 48cm의 긴 목재 블록을 사용하여 실험을 간편화 하였다. 또한 상사법칙에 의해 $1.4 \times 10^{-2} \text{ kN/m}$ 강도의 보강재가 필요하였다. 그래서 적당한 축소 보강재로써는 $6.0 \times 10^{-2} \text{ kN/m}$ 의 강도를 지닌 화장지로 사용하였다.

2.2 계측

계측 데이터 분석은 변위계(LVDT)를 이용한 하단옹벽의 변위 분석, 붕괴시의 비디오 자료 분석, 붕괴시 한계높이 측정, 붕괴시 회수한 보강재 파단길이 분석으로 보강토 옹벽의 붕괴시 발생하는 현상들을 종합적으로 분석하였다. 변위계는 50mm 용량의 변위계를 하단옹벽의 5개소에 설치하였다.

3. 목적 및 실험 방법

3.1 실험 목적

그림 2은 보강토 옹벽의 모형실험에 대한 흐름도

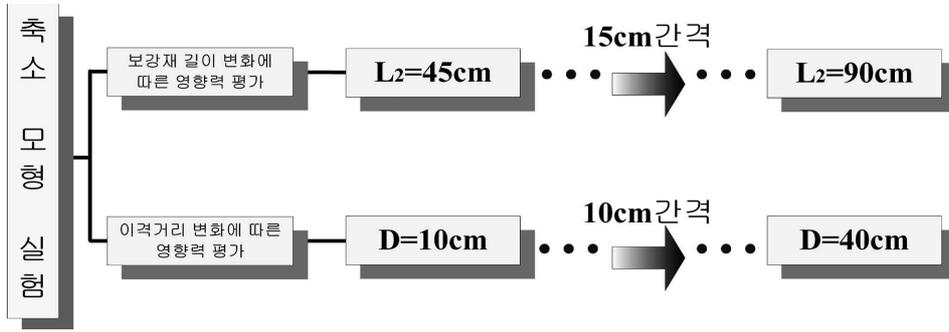
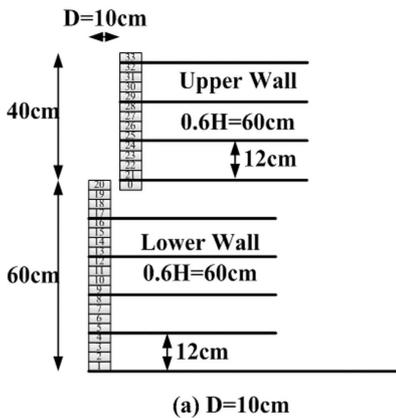
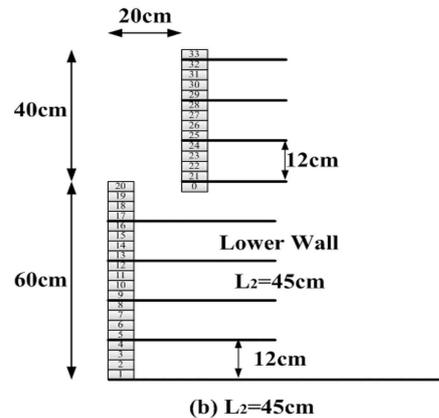


그림 2. 보강토옹벽의 모형실험 흐름도



(a) D=10cm
그림 3. 이격거리 변화



(b) L2=45cm
그림 4. 보강재 길이변화

를 보여주고 있다. 그림 3과 4는 보강재 길이변화에 따른 영향력평가, 이격거리변화에 따른 영향력 평가를 실시하여 보강토옹벽에 영향을 미치는 요인에 대한 분석을 수행하였다.

이격거리 변화에 따른 영향력 평가는 FHWA 설계법이 제시하는 상단옹벽을 상재하중으로 간주하는 경우(이격거리 $D = 10\text{cm}, 20\text{cm}$)와 상단옹벽의 하중을 무시하는 구간(이격거리 $D = 30\text{cm}, 40\text{cm}$)으로 나누었고, 보강재 길이 변화에 따른 영향력 평가는 FHWA 설계법이 제시하는 최소 보강재길이를 기준으로 하단옹벽의 보강재 길이가 짧은 경우와 긴 경우를 비교하여 실험하였다. 이는 축소 모형 실험을 통해 FHWA 설계법이 제시하는 상단옹벽의 처리 기준의 적합성 여부를 확인하는데 그 목적이 있다.

3.1 실험 방법

보강재가 설치되는 층 전까지 목재 블록을 쌓고

표준사를 강사 시킨 후 블록에 설치된 보강재를 설치한다. 이 과정들을 반복적으로 수행하며 10cm 간격마다 염색사를 포설하였다. 하단옹벽의 성토가 완료된 후 상단옹벽을 설치하기 위해 기초블록을 설치하였으며 모형 보강토옹벽의 성토는 붕괴시까지 실시하여 한계높이를 산정하였다.

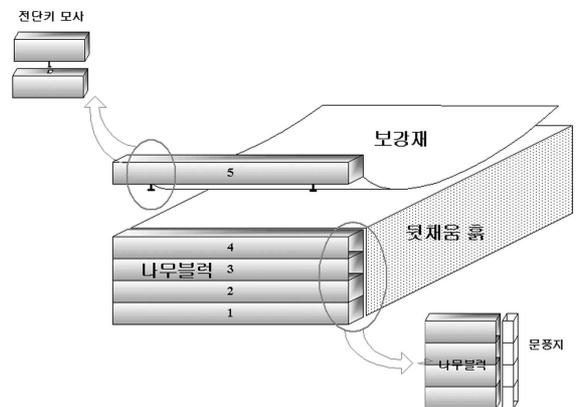


그림 5. 실험 과정 모식도

4. 결과분석

4.1 이격거리의 영향에 따른 파괴면

그림 6은 각각의 이격거리(D)에 대한 붕괴 시 모습을 보여주고 있다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 D가 증가 할수록 하단옹벽의 파괴각은 완만해진다. 또한 이격거리 10cm의 경우 상·하단 옹벽의 파괴각은 단일 옹벽의 파괴 양상과 비슷하게 일체의 파괴각을 볼 수 있으나, 이격거리가 증가해 40cm 일 경우는 상단옹벽이 먼저 파괴가 되는 것으로 보아 상단옹벽은 하단옹벽에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 분석되었다.

4.2 이격거리의 영향에 따른 한계높이

그림 7은 이격거리 변화에 따른 한계높이 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 이격거리가 증가 할수록 한계높이는 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 FHWA 설계법이 제시하는 상단옹벽의 하중을 무시하는 구간(30cm 이상)에서는 한계높이가 급격히 증가해 하단옹벽에 미치는 영향은 작아지는

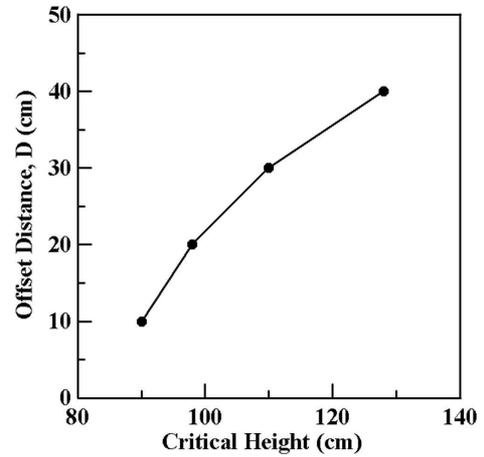
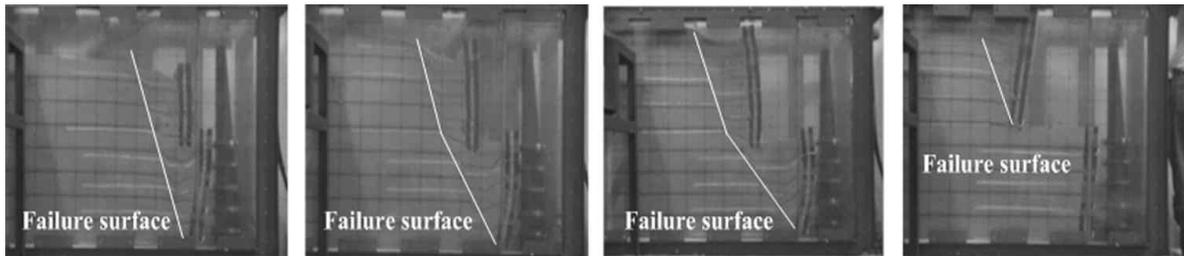


그림 7. 이격거리 vs 한계높이

것으로 분석되었다. 표 1은 이격거리 변화에 따른 한계높이와 파괴 형태를 보여주고 있다.

그림 8은 하단옹벽의 수평변위 profile을 보여주고 있고, 이 수평변위 profile은 80cm 성토 시 발생하는 하단옹벽의 수평변위를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 원형의 계단식 보강토옹벽의 수평변위 발생경향과 거의 동일하게 나타났다. 최대 수평변위 발생 영역은 2/3H 지점에서 발생하였고, 이격거리 30cm 이상의 구간에서는 하단옹벽의 수평변위가 급격히 감소됨을 알 수 있다.



(a) D=10cm

(b) D=20cm

(c) D=30cm

(d) D=40cm

그림 6. 이격거리 증가에 따른 파괴면의 변화

표 1. 이격거리 변화에 따른 한계높이 결과

이격거리 변화에 따른 영향력 평가		
Case	한계높이(m)	비고
D=10cm	90cm	상부전도에 의한 파괴, 최 상단에서 최대 수평변위 발생
D=20cm	98cm	하단옹벽 배부름에 의한 파괴2/3에서 최대 수평변위발생
D=30cm	110cm	하단옹벽 배부름에 의한 파괴2/3에서 최대 수평변위발생
D=40cm	128cm	상단옹벽 상부전도에 의한 파괴

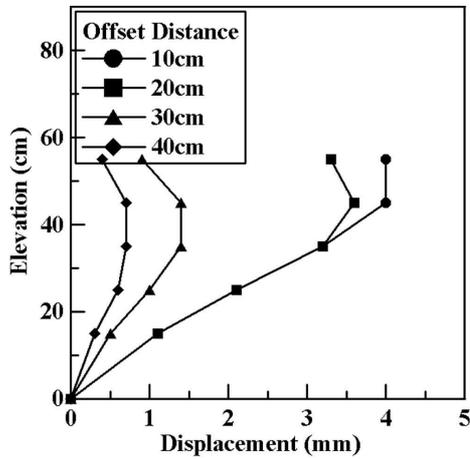


그림 8. 하단옹벽의 수평변위 profile

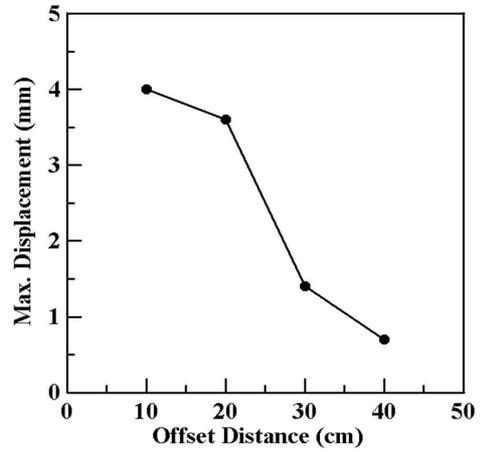


그림 9. 이격거리 vs 최대 수평변위

이를 종합적으로 분석해 본 결과 이격거리에 따라 하단옹벽에 미치는 영향력은 변화하며, FHWA 설계법이 제시하는 상단옹벽을 하중으로 무시하는 구간에서는 갑작스런 변위 감소와 상단옹벽의 붕괴만 이루어지는 것으로 보아 현 설계법은 합당한 것으로 분석되었다.

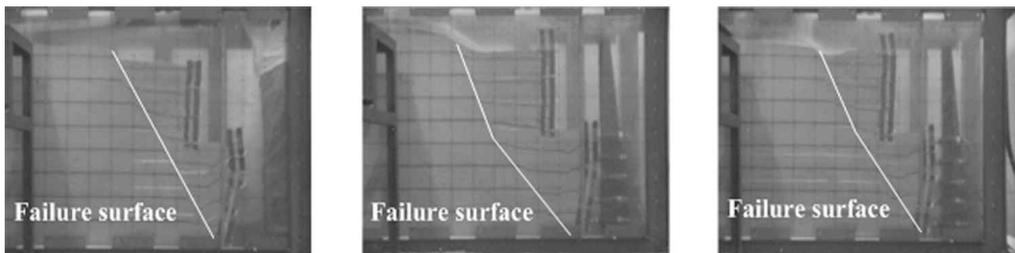
붕괴 모습을 보여주고 있다. 하단옹벽의 길이가 짧은 경우에는 상단옹벽의 인발파괴와 더불어 하단옹벽의 배부름에 의한 파괴가 발생하였고, 하단옹벽의 길이가 긴 경우에는 충분한 보강재 길이로 인하여 배부름에 의한 파괴가 발생하였다.

4.3 보강재 길이의 영향에 따른 파괴면

그림 10은 하단옹벽 보강재 길이(L_1) 변화에 따른

5. FHWA설계기준 검토

그림 11은 이격거리 변화에 따른 FHWA 설계법의 파괴면과 실험시 파괴면을 비교 나타내었다. 두 파괴



(a) $L_1=45\text{cm}$

(b) $L_1=60\text{cm}$

(c) $L_1=90\text{cm}$

그림 10. 보강재 길이변화에 따른 파괴면의 변화

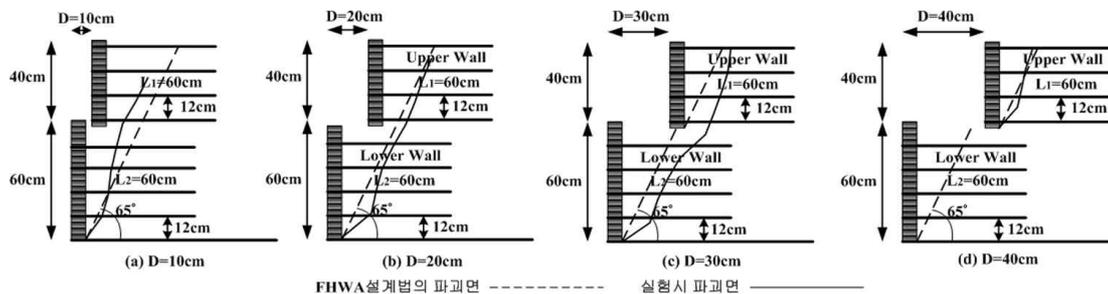


그림 11. 이격거리에 변화에 따른 FHWA 설계법의 파괴면과 실험시 파괴면

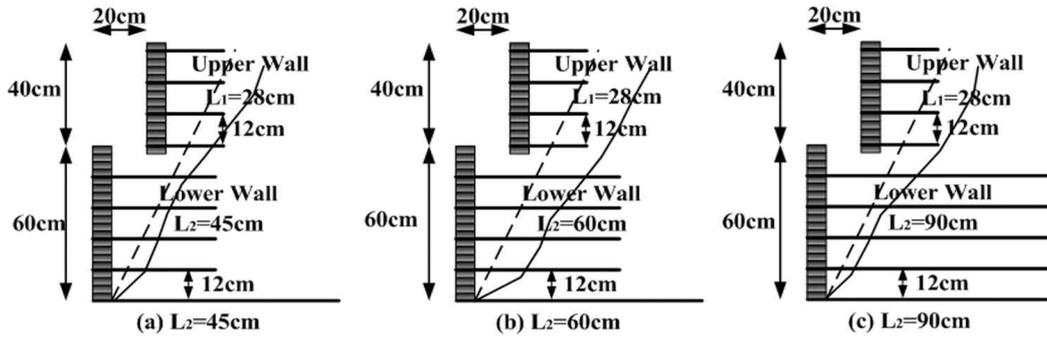


그림 12. 보강재 길이변화에 따른 FHWA설계법의 파괴면과 실험시 파괴면

면을 비교하여 볼 경우 $D=30\text{cm}$ 인 경우를 제외한 나머지 영역에서는 FHWA설계법의 파괴면과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

그림 12는 보강재 길이 변화에 따른 FHWA설계법의 파괴면과 실험시 파괴면을 비교 나타내었다. 그 결과 실제의 파괴면은 FHWA설계법에서 제시하는 파괴면 보다 뒤쪽에서 발생하고 있었다. 보강재 길이 변화에 대한 영향은 일부 한계높이의 영향에만 미칠 뿐 파괴각의 변화는 찾아 볼 수 없었다. 또한 FHWA설계법에서의 파괴면과 실험의 파괴면은 일부 차이를 보이고 있어 이에 관련하여 연구가 더 필요한 것으로 사료된다.

본 장에서 분석해 본 내용을 정리하면 FHWA설계법의 파괴면과 실험의 파괴면은 일부 구간에서 상이함을 보이고 있으나, 이는 실험에서 반영된 토조 벽면과 블록, 블록과 블록면 사이의 마찰을 고려하지 않은데 기인된 것이며, 이를 반영 할 경우 FHWA설계법과 실험의 파괴면은 거의 일치한다고 할 수 있으며, 현행의 FHWA설계법은 타당한 설계법임을 입증하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 계단식 보강토 옹벽의 파괴메카니즘 연구를 위해 축소 모형 실험을 실시하였고, 해석을 통하여 실험부분을 검증하였다. 또한 이를 통하여 현행 보강토옹벽의 설계법인 FHWA설계법을 근거로 이격거리 변화 및 보강재 길이 변화에 대해 타당성 분석을 실시하였고, 이에 얻어진 결과는 다음과

같다.

1. 축소 모형 실험 시 붕괴된 옹벽에서 회수한 보강재 파단사진 분석한 결과 보강재 파단면은 여러개 존재하며, 이는 붕괴 시 파괴각이 변화하여 여러 조각의 파단면이 발생한 것으로 분석되었다. 이는 보강토옹벽의 붕괴시는 파괴각이 변화하는 것을 알 수 있다.
2. 실험을 통해 보강재 위치를 확인 할 수 있었고, 이를 통하여 파단면의 위치는 보강재의 설치 위치가 높아질수록 선단에서 멀어지고 있는 것을 확인 할 수 있었다.
3. 이격거리 변화에 따른 영향력으로는 이격거리가 증가 할수록 한계높이는 증가하고, FHWA설계법이 제시하는 상단옹벽을 개별옹벽으로 간주하는 구간에서는 급격한 한계높이 증가를 보여 하단옹벽에 미치는 영향이 작아지는 것을 알 수 있다.
4. 보강재 길이변화에 따른 영향력으로는 보강재 길이가 증가 할수록 한계높이는 증가하나 FHWA설계법이 제시하는 상단옹벽을 개별옹벽으로 간주하는 구간에서는 증가 하지 않아 현행 FHWA설계법은 합당한 설계법으로 나타났다. 그러나 축소 모형 실험의 파괴면과 FHWA설계법의 파괴면이 서로 일치하지 않아 이에 대한 연구가 더 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 유충식(2001), 다단식 보강토 옹벽의 설계 - 사례연구,

- 2001 가을 학술발표회 논문집, 한국토목섬유학회.
2. 유충식, 김주석(2002), 계단식 보강토옹벽의 거동 특성, *한국지반공학학회논문집*, 한국지반공학회, Vol. 2, No. 4, pp. 7~19.
 3. 유충식, 정혁상(2004), 계단식 형태의 실대형 블록식 보강토 옹벽의 거동, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, Vol. 24, No 4C.
 4. 유충식, 정혁상 정혜영(2004), 보강토옹벽의 사고사례에 관한 연구, *한국지반공학회 분학술발표회 논문집*, 한국지반공학회.
 5. Andrej Sawicki, Danuta Lesniewska,(1987), “*Failure Modes and Bearing Capacity of Reinforced Soil Retaining Walls*” *Geotextile and Geomembranes*, Vol.5 No. 1, pp. 29~44.
 6. Ali Porbaha(2000) *Upper bound estimate of scaled reinforced soil retaining walls*, *Geotextile and Geomembranes*, Vol. 18 No. 6, pp. 403~413.
 7. Bathrust, R.J. and Benjamin, D.J.(1990), “*Failure of Geogrid-Reinforced Soil Wall*”, *Transportation Research Board* 1288, pp. 109~116
 8. FHWA(1997) *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design and Construction Guidelines, FHWA Demonstration Project 82*, FHWA, Washington, DC, FHWA-SA-96-071.
 9. K. S. Wong, B.B.Broms, B. Chandrasekaran(1994), “*Failure Modes and Model Test of a Geotextile Reinforced Wall*,” *Geotextile and Geomembranes*, Vol. 13, No. 6,7, pp. 475~493.