

지주식흙막이의 두부 연결 방법에 따른 안정성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Stability of IER according to the Head Connection Method

| | | | |
|--------------------|--------------|--------------------|------------------|
| 유 재 원 ¹ | Yoo, Jae-Won | 임 종 철 ² | Im, Jong-Chul |
| 서 민 수 ¹ | Seo, Min-Su | 김 창 영 ³ | Kim, Chang-Young |

Abstract

The Inclined Earth Retaining Structure (IER) is the structure using an integrated system of both front supports and inclined back supports to increase the stability for excavation. The IER is a structurally stable temporary excavation method using the back supports restraining the lateral displacement of the front supports as stabilizing piles. The back supports connected to the front supports significantly reduce the earth pressure acting on both the front wall and the front supports by distributing it to the back supports in order to increase the structural stability. In this study, mechanical behaviors of IER according to the head connection type using fixed- or hinge-connection were found by performing numerical analysis and laboratory model tests in the sandy ground. The maximum lateral displacement of fixed-connection was 88% of that of hinge-connection in the numerical analysis. The lateral displacement of fixed-connection was 7% of that of hinge-connection in the laboratory model test results. Furthermore, the earth pressure of the fixed-connection was 67% of that of the hinge-connection in the shear-strain analysis results of the model ground.

요 지

IER은 굴착 중에 안정성을 증가시키기 위해서 전면지주에 배면지주를 기울어지게 설치하고 강결시킨 구조이다. IER은 배면지주가 역지말뚝의 역할을 함으로써 전면지주에 발생하는 수평변위를 억제하는 효과가 있고, 전면지주에 작용하는 토압을 분산시켜 구조적으로 안정한 가시설 공법이다. 본 연구에서는 사질토 지반에서 수치해석과 실내모형실험을 통해 IER의 두부를 강결과 힌지로 조건을 다르게 연결하여 IER의 역학적 특성을 확인하였다. 수치해석 결과, 최대수평변위는 두부의 연결 방법이 강결일 때 힌지일 때의 88%가 발생하고 실내모형실험 결과, 수평변위는 두부 연결 방법이 강결일 때 힌지일 때의 단지 7%만 발생하는 것으로 분석되었다. 또한, 지반의 전단변형 해석 결과 토압은 두부의 연결 방법이 강결일 때 힌지일 때의 67%만 작용하는 것으로 분석되었다.

Keywords : IER, Inclined Earth-Retaining Structure, Head connection method, fixed, Hinge

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ.)

2 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., Tel: +82-51-510-2442, Fax: +82-51-518-3084, imjc@pusan.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 비회원, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원 (Researcher of RIIT, Pusan National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

기존 흙막이 공법의 단점들을 보완하여 개발된 IER은 엄지말뚝(이하 전면지주)과 억지말뚝(이하 배면지주)을 경사지게 설치하여 일체화시킨 가시설 공법으로, 배면지주의 설치로 인해 전면지주에 작용하는 토압을 효과적으로 분산시키고 전도에 대한 안정성을 높여 가시설의 구조적인 안정성을 증대시킨 공법이다. 또한 IER은 전면지주와 배면지주를 강결하여 일체화 시켜 구조적으로 안정된 공법이다(Seo et al., 2012). 하지만 IER을 현장에 실제로 적용 시 현장에서 전면지주와 배면지주의 연결 시 용접 불량으로 인해 배면지주가 전면지주를 잡아주는 역할을 할 수 없게 되어 배면지주가 억지말뚝의 효과만 작용하여 수평변위가 과다하게 발생하였다.

먼저, 본 연구에 앞서 모래지반(Seo et al., 2012)과 점토지반(Jeong et al., 2013)에서 실내모형실험을 실시하여 배면지주의 설치로 인한 IER의 수평변위억제효과와 구조적 안정성을 확인하였다.

그리고 본 연구에서는 두부의 연결이 일체화된 경우를 강결 조건으로, 용접 불량에 의해 볼트와 너트만으로 연결된 경우를 힌지 조건으로, 그리고 전면지주와 배면지주가 완전 파괴된 경우를 자유단 조건으로 가정하여 두부 연결 방법에 따른 IER의 안정성을 분석하고자 수치해석과 실내모형실험을 두부 연결 방법의 조건을 달리하여 실시하고, 수평변위의 결과와 지반의 전단변형 해석 결과를 분석하여 수평변위 억제와 토압의 감소를 통해 두부 연결 방법에 따른 구조적 안정성의 차이를 분석하였다.

2. IER의 개요

2.1 IER의 특징(Seo et al., 2015; Jeong et al., 2013)

IER의 특징은 크게 4가지로 구분될 수 있는데 첫 번째로 연직굴착 보다 전면지주를 사향으로 설치하므로 Fig. 1의 (A)의 흙무게가 경감되어 토압이 감소되는 효

과가 발생한다. 두 번째로 지주의 구조 형태인 전면지주와 배면지주의 강결로 인해 측방 변위가 억제되는 효과가 있으며(D), 세 번째로 배면지주와 지반의 마찰저항으로 인해 앵커링(Anchoring) 효과가 발생하여 구조적 안정을 더해준다(E). 마지막으로 배면지주의 억지말뚝 효과로 인해 전면지주에 작용하는 토압을 감소시키는 효과가 있다(C). 또, 지반이 연약할 때 별도의 앵커를 설치할 수 있는 구조로 되어 있다(F).

2.2 선행연구 결과

본 연구에 앞서 기존의 1열 흙막이 구조(이하 외지주식)에 배면지주의 설치로 인한 구조(이하 이중지주식)인 IER의 수평변위억제효과와 구조적 안정성을 확인하기 위해 모래지반(Seo et al., 2012)과 점토지반(Jeong et al., 2013)에서 실내모형실험을 실시하였다.

그 결과 모래지반에서는 Table 1처럼 동일한 굴착 깊이 40cm에서 수평변위는 배면지주가 설치된 이중지주식일 때 외지주식일 때의 8%만 발생하는 것으로 분석되었고, 점토지반에서는 Table 2처럼 배면지주가 자유단인 이중지주식이 외지주식에 비해 굴착 깊이 40cm에서 수평변위가 32%만 발생하고 파괴 시의 굴착 깊이가

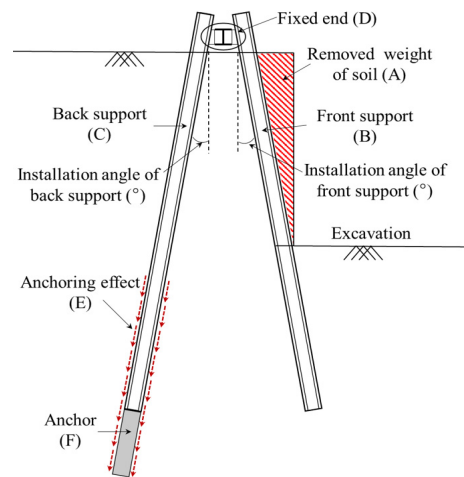


Fig. 1. Basic structure of IER (Seo et al., 2015; Jeong et al., 2013)

Table 1. The results of model tests in sandy ground (Seo et al., 2012)

| No. | Inclining angle of front support (°) | Inclining angle of back support (°) | Lateral displacement after excavation of 40 cm (mm) | Lateral displacement ratio after excavation of 40 cm | excavation depth at failure (cm) |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|----------------------------------|
| Single support | 0 | - | 1.045 | 1.00 | 45 |
| Double support | 0 | 10 | 0.088 | 0.08 | 65 |

Table 2. The results of model tests in clay ground (Jeong et al., 2013)

| No. | Inclining angle of front support (°) | Inclining angle of back support (°) | Conditions of back support fixed end | Lateral displacement after excavation of 40 cm (mm) | Lateral displacement ratio after excavation of 5 cm | excavation depth at failure (cm) |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---|----------------------------------|
| Single support | 0 | — | free | 4.4 | 1.00 | 7.0 |
| Double support 1 | 0 | 10 | fixed | 1.4 | 0.32 | 10.3 |
| Double support 2 | 0 | 10 | fixed | 0.0 | 0.00 | 30.6 |

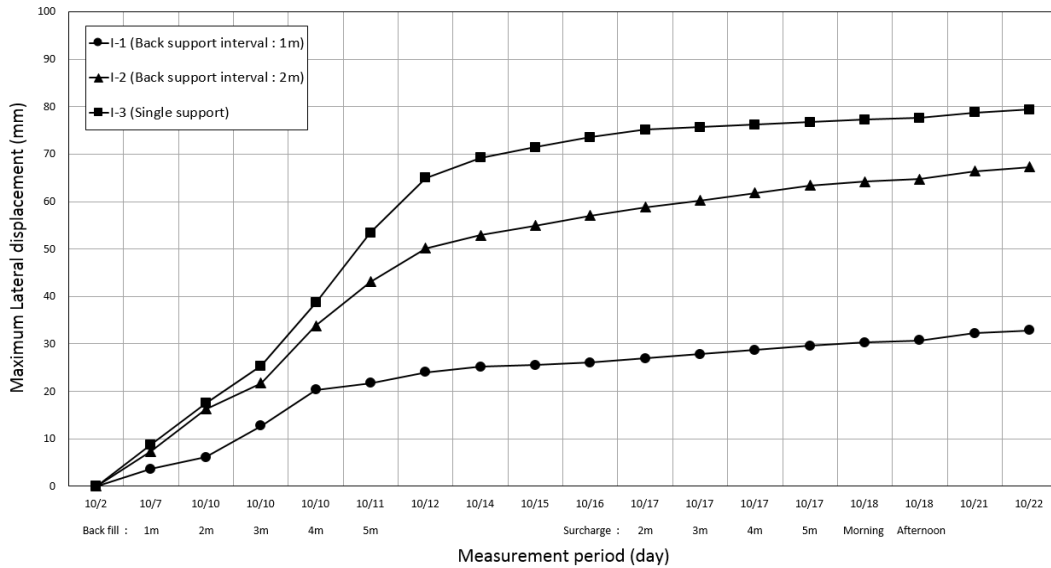


Fig. 2. Maximum lateral displacements of each tests

까지는 1.47배 더 굴착이 가능한 것으로 판단되었고, 배면지주가 고정단인 이중지주식의 경우에는 수평변위는 거의 발생하지 않고 파괴 굴착 깊이까지 4.37배 더 굴착이 가능한 것으로 분석되었다. 따라서 IER에서 배면지주의 설치로 인해 수평변위가 억제되고, 파괴 시의 굴착 깊이가 증가하여 동일한 굴착 깊이에서는 수평변위의 발생량이 적기 때문에 전면지주에 가해지는 토압 또한 감소하는 것으로 확인되었다.

또한, 경상북도 영천시 금노동 일원의 복선 전철화 노반신설공사 현장에서 실시한 가시철 흙막이 검토를 위한 시험시공(Back et al., 2014)에서 Fig. 2와 같이 지중 경사계로부터 측정된 배면 뒤채움 시의 수평변위는 이중지주식(설치간격 1.0m)에서 32.8mm가 발생하였으며, 이중지주식(설치간격 2.0m)에서는 67.3mm, 외지주식에서는 79.3mm가 발생하였다. 그리고 뒤채움 종료 후 철도하중에 해당되는 성토고 3.2m까지 추가 상재 시의 수평변위는 이중지주식(설치간격 1.0m)의 경우 3.33mm, 이중지주식(설치간격 2.0m)의 경우 7.13mm가 발생하였다. 현장실험 결과 IER에 의한 수평변위 억제 효과가

확인 되었으며, 철도 등 변위가 억제 되어야 하는 현장에서 효율적으로 사용 가능 할 것으로 확인되었다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 모델링의 조건

실내모형실험을 수행하기에 앞서 먼저, 수치해석 프로그램을 이용하여 강결과 힌지의 두부 연결 방법에 따라 발생하는 수평변위를 비교하였다. 프로그램은 MIDAS CIVIL을 사용하였으며, 해석 조건은 Fig. 3과 같이 전면지주의 각도는 0°, 배면지주의 각도는 10°이고, 부재는 350×350×12×19 규격의 H-pile 강재를 사용하였다. 하중은 모든 종류에서 똑같이 바닥에서 2/3 지점에 100kN의 집중하중을 전면지주에 작용시켰으며, 바닥의 지점은 고정단, 연결된 두부는 강결(고정단)과 힌지 그리고 자유단으로 조건을 다르게 하여 분석하였다. 자유단은 전면지주와 배면지주를 연결하지 않은 상태를 고려하였다.

Table 3. Types and results of numerical analysis

| No. | Head Connection method of IER | Applied horizontal load at front support (kN) | Maximum Lateral displacement (mm) | Maximum lateral displacement ratio CASE 1 / CASE 2 | Maximum lateral displacement ratio CASE 1 / CASE 3 |
|--------|-------------------------------|---|-----------------------------------|--|--|
| CASE 1 | Fixed | 100 | 4.721 | 0.88 | 0.41 |
| CASE 2 | Hinge | 100 | 5.341 | | |
| CASE 3 | Free | 100 | 11.519 | | |

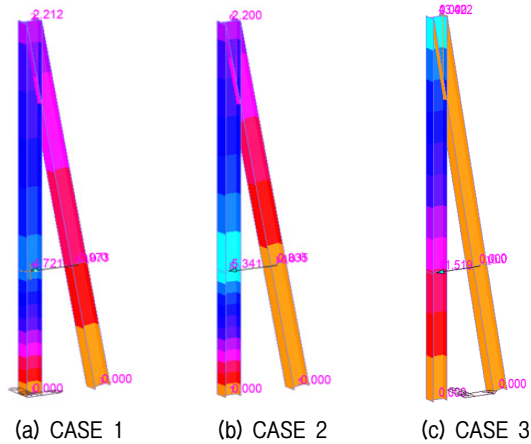


Fig. 3. Conditions of numerical analysis modeling

3.2 수치해석 결과 및 분석

수치해석 결과는 다음 Table 3과 같다. 전면지주가 연직이고 배면지주가 10° 일 때, 두부 연결 방법을 강결로 하였을 경우와 힌지로 하였을 경우를 비교하면 강결로 하였을 경우 최대수평변위가 약 12% 감소하는 것으로 분석되었고, 강결인 경우와 자유단인 경우를 비교하면 최대수평변위는 강결일 때 자유단일 때의 59%가 감소하는 것으로 분석되어 두부 연결 방법을 강결로 하였을 경우 힌지와 자유단으로 하였을 경우와 비교하면 구조적으로 더 안정한 것으로 분석되었다.

4. 실내모형실험

4.1 실험장치 및 지반재료

Fig. 4는 본 연구에 적용된 평면변형률 모형 토조를 나타낸 것이다. 평면변형률 조건을 만족하기 위해 변형이 발생하지 않도록 두께 30mm의 두꺼운 투명아크릴로 벽체를 형성하였으며, 추가적으로 280×380mm 간격으로 철재로 보강하여 길이방향 변형이 발생하지 않도록 장치를 제작하였다. 모형 토조의 내부 제원은 길이 1700mm, 높이 760mm, 폭 410mm이며, 지반의 조성은

Table 4. Properties of Jumunjin standard sand (Park, 2003)

| Types | Symbol | Value |
|-------------------------|--------------------------|-------|
| Maximum void ratio | e_{max} | 0.923 |
| Minimum void ratio | e_{min} | 0.604 |
| Maximum dry density | $\gamma_{dmax} (g/cm^3)$ | 1.652 |
| Minimum dry density | $\gamma_{dmin} (g/cm^3)$ | 1.378 |
| Specific gravity | G_s | 2.65 |
| Water content | w (%) | 0.30 |
| Average particle size | D_{50} (mm) | 0.595 |
| Effective particle size | D_{10} (mm) | 0.443 |
| Uniformity coefficient | C_u | 1.402 |
| Coefficient curvature | C_g | 0.912 |

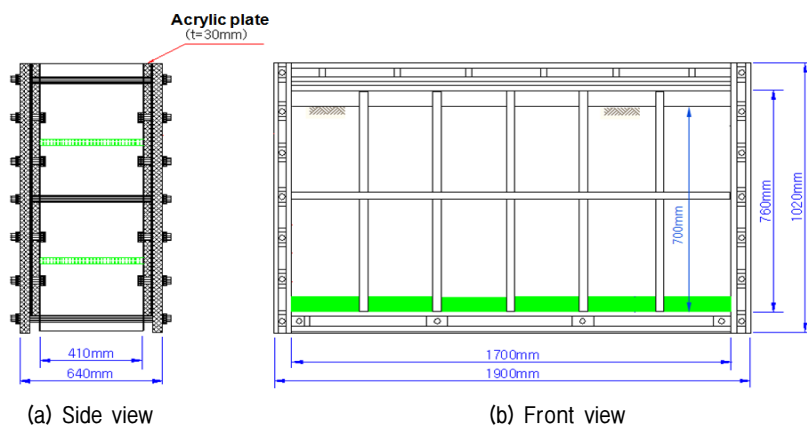


Fig. 4. Side view and front view of plane strain soil tank (Park, 2003)

Table 5. Variation of the relative density and friction angle (ϕ_{DS}) of Jumunjin standard sand (Park, 2003)

| Test No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| γ_d (g/cm^3) | 1.378 | 1.468 | 1.522 | 1.561 | 1.572 | 1.602 | 1.632 | 1.646 |
| Dr (%) | 0 | 36.9 | 57.0 | 70.7 | 74.4 | 84.3 | 93.8 | 98.2 |
| ϕ_{DS} ($^\circ$) | 31.2 | 33.0 | 35.0 | 37.7 | 38.0 | 39.2 | 41.1 | 42.0 |

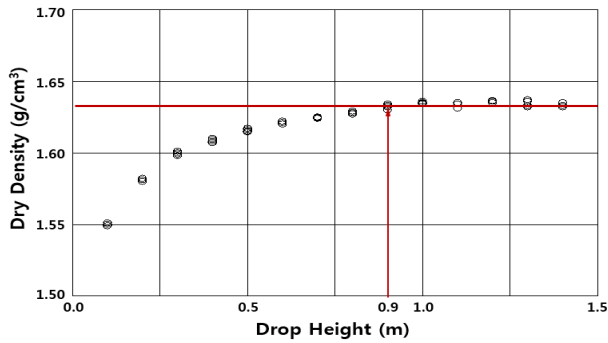


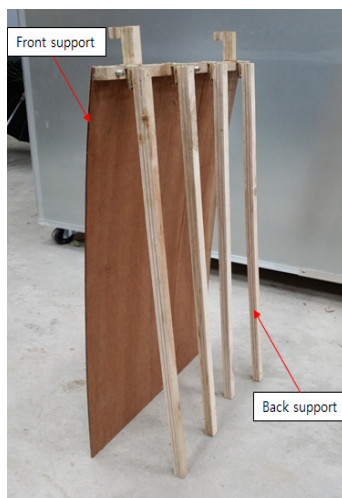
Fig. 5. Dry density relative to drop height of Jumunjin standard sand (Park, 2003)

주문진 표준사로 하였다. 주문진 표준사의 물리·역학적 특성은 Table 4와 Table 5과 같다. 사질토는 Table 5과 같이 밀도에 따라 역학적 특성이 매우 민감하게 변하기 때문에, 밀도를 일정하게 유지하여 지반을 조성하여야 한다. Fig. 5는 주문진 표준사의 낙하고에 따른 건조밀도의 변화를 나타낸 것이다. 낙하고가 0.9m에서 부터 밀도는 1.625g/cm³에 가까이 수렴하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서는 낙하고 1.2m에서 강사법(Ko et al., 1996; Park, 2003; Seo et al., 2012; Yoo et al., 2016)으로 지반을 제작하여, 밀도를 일정하게 조성하였다. 이때의 건조

밀도는 1.632g/cm³이고, 상대밀도는 93.8%이다.

4.2 실험 조건 및 종류

IER의 전면지주 및 배면지주의 모형은 Fig. 6(a)와 같이 목재를 사용하여 제작하였다. 흙막이 전면은 전면지주와 토류판으로 구성되나 본 연구에서는 전면지주와 토류판을 분리하여 제작하지 않고 일체화된 벽체로 제작하여 실험하였다. 전면지주와 배면지주의 사이에는 연결터미를 설치하여 실험 종류에 따른 경사각을 유지시킬 수 있게 하였다. 수치해석 결과, IER의 두부 연결 방법이 힌지인 경우와 강결인 경우만을 비교하더라도 힌지인 경우 수평변위가 강결인 경우 보다 더 많이 발생하는 것으로 분석되었고, 자유단인 경우 과도한 수평변위가 발생하는 것으로 분석되어 실내모형실험에서는 자유단인 경우를 제외하고 강결, 힌지인 2가지 경우만을 고려하여 실험을 실시하였다. 강결인 경우는 Fig. 6(b)와 같이 움직임이 발생하지 않도록 연결터미와 배면지주 사이에 나사를 사용하여 고정 하였고, 힌지의 경우는 Fig. 6(c)와 같이 연결터미에 경첩을 사용하여 배면지주의 회전이 가능하도록 제작하였다. 전면 및 배면지주의



(a) Basic structure of IER model



(b) Fixed



(c) Hinge

Fig. 6. Small scale IER structure

연직길이는 조성된 지반의 높이와 같게 70cm로 제작하였다. 지주들의 두께는 전면지주는 3mm, 배면지주는 실험 종류에 따라 3mm와 15mm로 제작하였다.

실제, 모형 토조 실험은 상사성을 고려하여 실시하지만 본 연구에서는 IER의 두부 연결 방법이 강결인 경우와 힌지인 경우를 수평변위 결과로 단순 비교 검토하고, 지반의 전단변형 해석을 통해 배면지반의 파괴면으로 결정된 파괴되는 토괴의 크기로부터 두부 연결 방법을 강결로 하였을 경우의 효과에 대한 경향성만을 분석하고자 한다. 그러므로 정확한 두부 연결 방법의 차이에 의한 지반 거동에 관한 연구는 현장실험 및 계측을 통해 분석되어야 할 것으로 판단된다.

Table 6은 실험 종류별 실험 조건을 정리한 것이다. 두부 연결 방법이 강결인 경우와 힌지인 경우를 배면지주의 두께와 전면지주와 배면지주가 설치되는 각도를 달리하여 진행하였고, 두부 연결 방법에 따른 분석을 위해 총 8가지의 실험을 실시하였다.

4.3 실험 방법

먼저 평면변형 토조에 IER을 설치하고, 지반 조성 시 모래의 밀도 차이가 발생하지 않도록 한 층의 두께는 1~2cm로, 높이는 1.2m로 유지하여 포설하였다. 본 연구에서는 두부 연결 방법에 따른 차이를 확인하기 위한 실험으로 Fig. 7과 같이 전면지주 상부 2곳에 1/100mm의 계측이 가능한 다이얼 게이지를 이용하여 벽체 상부에 발생하는 좌·우 수평변위를 측정 하였으며, 이 결과들을 평균하여 굴착고에 따른 IER의 거동을 분석하였다. 또한, 타겟은 뒷면에 모래보다 마찰각이 큰 사포를

부착하여 지름 1cm 크기로 제작하였고 타겟 설치의 각 단계는 모래를 타겟 1열의 설치 간격인 4cm보다 낮은 높이인 약 3.5cm까지 포설 후 최대한 지반이 교란 되지 않도록 타겟을 벽면에 밀착하여 끝을 모래에 삽입하고 다음 단계의 타겟 설치 높이까지 다시 모래를 포설하였다. 각각 굴착 단계는 토조 내부 폭 410mm와 같은 길이의 얇은 판을 이용하여 전면지주가 있는 위치에서 배면지주의 반대 방향으로 여러 번 굴착하여 최종 약 5cm까지 굴착하였고, 각 굴착 단계의 종료 시 마다 사진을 촬영하여 각각의 타겟이 이동한 경로를 지반 전단변형 해석 프로그램(Koo, 2012)으로 해석하였다. 그리고 해석된 결과로부터 파괴되는 토괴의 크기를 비교 분석하여 토압 감소 효과를 분석하였다.

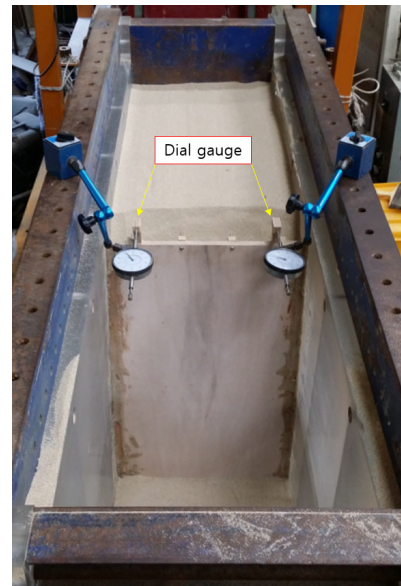


Fig. 7. Top view of dial gauge installation

Table 6. Types and conditions of model tests

| No. | Head Connection method | Angle of front support (°) | Angle of back support (°) | Thickness of front support (mm) | Thickness of back support (mm) |
|----------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| F-10FS-0BS-t3 | Fixed | 10 | 0 | 3 | 3 |
| H-10FS-0BS-t3 | Hinge | 10 | 0 | 3 | 3 |
| F-10FS-0BS-t15 | Fixed | 10 | 0 | 3 | 15 |
| H-10FS-0BS-t15 | Hinge | 10 | 0 | 3 | 15 |
| F-5FS-5BS-t15 | Fixed | 5 | 5 | 3 | 15 |
| H-5FS-5BS-t15 | Hinge | 5 | 5 | 3 | 15 |
| F-0FS-10BS-t15 | Fixed | 0 | 10 | 3 | 15 |
| H-0FS-10BS-t15 | Hinge | 0 | 10 | 3 | 15 |

*Description of test name: F, Fixed of IER head connection method; 10, 5 and 0, installation angle of front support; FS, front support; 0, 5 and 10, installation angle of back support; BS, back support; H, hinge of IER head connection method; t, thickness of back support.

각 실험 종류별 최종 굴착 깊이는 과도한 수평변위가 발생하여 IER이 전도가 되는 기점을 기준으로 종료하였다. Fig. 8은 모형을 설치하고, 지반을 조성한 상태를 토조 정면에서 촬영한 사진이다.

4.4 실험 결과

4.4.1 실험종류별 수평변위

실험 종류별 측정된 좌, 우측의 벽체 선단의 수평변위를 평균하여 수평변위를 정리한 것이 Table 7이다. 실험 결과를 보면 배면지주의 두께가 3mm인 경우 강결과 힌지의 수평변위 발생량의 차이는 크지 않지만 굴착 깊이가 20cm부터 수평변위 발생량의 차이가 발생한다. 그리고 배면지주의 두께가 15mm인 실험들에서도 굴착 깊이가 20cm부터 수평변위의 발생량의 차이가 발생하여 각각의 실험별 비교 가능한 구간의 굴착 깊이에서는 수평

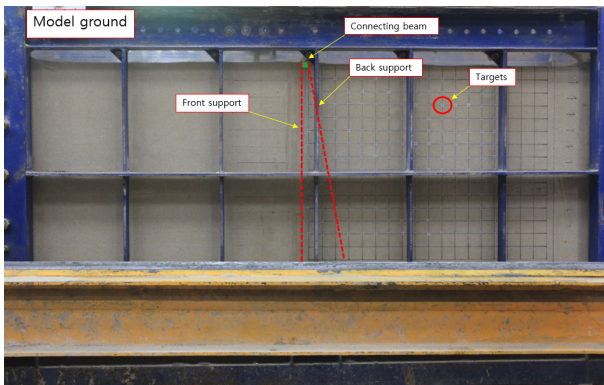


Fig. 8. Front view of IER model and target

변위의 차가 일정하게 변화하는 양상을 보이고 있으며 각각의 실험 모두 두부 연결 방법이 강결인 경우가 힌지인 경우에 비해 수평변위가 현저히 감소되는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 굴착 깊이와 수평변위의 관계 그래프를 나타내고 있다.

4.4.2 파괴 굴착 깊이

파괴 굴착 깊이는 Im(2016), Korean Geotechnical Society (2015) 등에서 Table 8, Table 9와 같이 제시하고 있는 주동 및 수동상태에 이르는 흙의 종류에 따른 변위량의 기준들 중에서 보다 보수적인 값인 Table 8의 회전변위 기준을 사용하였으며, 본 실험에 해당되는 조밀한 모래의 경우 0.0005-0.001을 제안하고 있어 평균값인 0.00075를 적용하였다.

Fig. 10은 식 (1)을 이용하여, 각 실험별 회전변위를

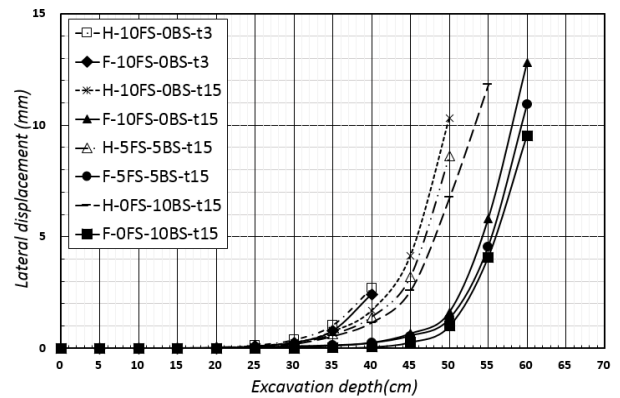


Fig. 9. Lateral displacement of front support relative to the excavation depth

Table 7. Lateral displacement during excavation

| Excavation depth (cm) | Lateral displacement (mm) | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| | H-10FS-0BS-t3 | F-10FS-0BS-t3 | H-10FS-0BS-t15 | F-10FS-0BS-t15 | H-5FS-5BS-t15 | F-5FS-5BS-t15 | H-0FS-10BS-t15 | F-0FS-10BS-t15 |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 15 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 | 0.002 | 0.001 | 0.015 | 0.000 | 0.060 | 0.015 | 0.007 | 0.000 |
| 25 | 0.135 | 0.105 | 0.136 | 0.000 | 0.118 | 0.040 | 0.075 | 0.000 |
| 30 | 0.380 | 0.260 | 0.260 | 0.065 | 0.240 | 0.085 | 0.210 | 0.000 |
| 35 | 1.035 | 0.788 | 0.755 | 0.125 | 0.635 | 0.125 | 0.560 | 0.025 |
| 40 | 2.690 | 2.420 | 1.695 | 0.265 | 1.420 | 0.235 | 1.170 | 0.070 |
| 45 | | | 4.150 | 0.675 | 3.210 | 0.553 | 2.605 | 0.280 |
| 50 | | | 10.320 | 1.630 | 8.605 | 1.315 | 6.765 | 1.000 |
| 55 | | | | 5.810 | | 4.553 | 11.828 | 4.075 |
| 60 | | | | 12.800 | | 10.918 | | 9.525 |

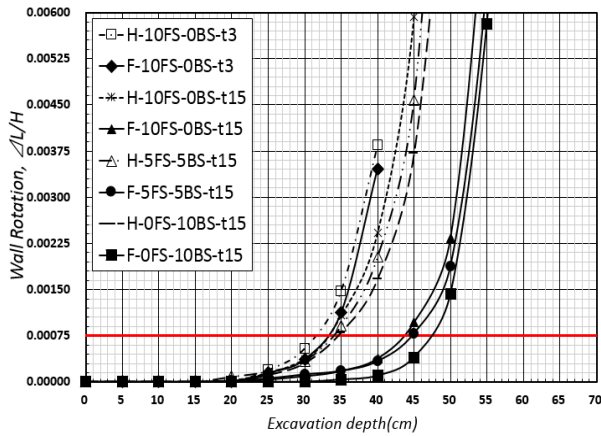


Fig. 10. Wall rotation of the front support relative to the excavation depth

Table 8. Rotational displacement of retaining wall structure during failure (Rankine, 1857)

| Soil type | Wall rotation (=Lateral displacement /Wall height) | |
|------------------|---|---------|
| | Active | Passive |
| Loose sandy soil | 0.001–0.002 | 0.01 |
| Dense sandy soil | 0.0005–0.001 | 0.005 |
| Soft clay soil | 0.02 | 0.04 |
| Stiff clay soil | 0.01 | 0.02 |

Table 9. Rotational displacement of retaining wall structure during failure (Canadian Geotechnical Society, 1985)

| Soil type | Wall rotation (=Lateral displacement /Wall height) | |
|------------------|---|---------|
| | Active | Passive |
| Loose sandy soil | 0.004 | 0.06 |
| Dense sandy soil | 0.001 | 0.02 |
| Soft clay soil | 0.020 | 0.04 |
| Stiff clay soil | 0.010 | 0.02 |

Table 10. Excavation depth at failure

| No. | Excavation depth at failure (cm) | No. | Excavation depth at failure (cm) |
|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|
| H-10FS-0BS-t3 | 31.6 | F-10FS-0BS-t3 | 33.3 |
| H-10FS-0BS-t15 | 33.4 | F-10FS-0BS-t15 | 43.8 |
| H-5FS-5BS-t15 | 34.0 | F-5FS-5BS-t15 | 44.9 |
| H-0FS-10BS-t15 | 34.9 | F-0FS-10BS-t15 | 47.5 |

Table 11. Lateral displacement ratio of retaining wall showing the effect induced by fixed of heads (the inclination of front support=10°, vertical back support, the thickness of back support=3 mm)

| Excavation depth (cm) | H-10FS-0BS-t3 | F-10FS-0BS-t3 | Lateral displacement ratio (F-10FS-0BS-t3 / H-10FS-0BS-t3) |
|-----------------------|---------------|---------------|---|
| 20 | 0.002 | 0.001 | 0.40 |
| 25 | 0.135 | 0.105 | 0.78 |
| 30 | 0.380 | 0.260 | 0.68 |

나타낸 것이고, Table 10은 회전변위에 의한 파괴기준 0.00075에 해당되는 파괴 굴착 깊이를 정리한 것이다.

$$\text{회전변위} \left(\frac{\Delta L}{H} \right) = \frac{\text{벽체 최상부의 수평변위}}{\text{벽체길이}} \quad (1)$$

5. 실험 결과 분석

본 연구에서는 IER의 두부 연결 방법의 변화에 따른 수평변위 감소효과는 수평변위비와 파괴 굴착 깊이비 (Jeong et al., 2013; Yoo et al., 2016)를 사용하여 비교 분석하였고, 토압 감소효과는 지반의 전단변형 해석 프로그램을 사용하여 IER의 파괴면을 통해 파괴되는 토괴의 크기를 비교 분석하였다. 분석한 결과는 다음과 같다.

5.1 두부 연결 방법에 따른 전면지주의 거동 분석

5.1.1 전면지주가 10°이고, 배면지주가 0° 일 때(배면 지주 두께:3mm)

Table 11은 수평변위가 발생하는 굴착 깊이 25~30cm 일 때, 두부 연결 방법이 힌지(H-10FS-0BS-t3)인 경우를 기준으로 하여 강결(F-10FS-0BS-t3)인 경우의 수평변위와 수평변위비를 정리한 것이다. 두부 연결 방법을 강결로 하였을 경우 수평변위가 40%~78%로 평균 62%만 발생함을 알 수 있다.

Table 12는 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비를 나타낸 것이다. 분석 결과, 굴착 깊이를 강결로 하였을 경우와 힌지로 하였을 경우를 비교하면 강결로 하였을 경

Table 12. Excavation depth at failure showing the effect induced by fixed of heads (the inclination of front support=10°, vertical back support, the thickness of back support=3 mm)

| Contents | Excavation depth at failure (cm) | Excavation depth ratio at failure (F-10FS-0BS-t3 / H-10FS-0BS-t3) |
|---------------|----------------------------------|--|
| H-10FS-0BS-t3 | 31.6 | 1.0 |
| F-10FS-0BS-t3 | 33.3 | 1.05 |

우가 1.05배 더 굴착이 가능할 것으로 판단되었다.

배면지주의 두께가 3mm인 경우 두부와 배면지주의 연결을 강결로 연결하더라도 배면지주의 강성이 약하기 때문에 변위가 발생했을 경우 강결과 힌지 두 경우 모두 배면지주가 쉽게 휘어져 두 경우의 차이가 크지 않은 것으로 분석되어, 배면지주의 두께를 강성이 큰 15mm의 배면지주로 하여 다음 실험을 수행하였다.

5.1.2 전면지주가 10°이고, 배면지주가 0° 일 때(배면지주 두께:15mm)

Table 13은 수평변위가 비교 가능한 30~45cm의 굴착 깊이 일 때, 두부 연결 방법이 힌지(H-10FS-0BS-t15)인 경우를 기준으로 강결(F-10FS-0BS-t15)인 경우의 수평변위와 수평변위비를 정리한 것이다. 수평변위는 두

부 연결 방법을 강결로 하였을 경우를 힌지로 하였을 경우와 비교하면 16%~25%로 평균 18.5%만 발생하였다.

Table 14는 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비를 나타낸 것이다. 분석 결과, 굴착 깊이는 강결일 때 힌지일 때의 1.31배 더 굴착이 가능할 것으로 판단되었다.

5.1.3 전면지주가 5°이고, 배면지주가 5° 일 때(배면지주 두께:15mm)

Table 15는 수평변위의 비교 가능한 굴착 깊이인 20~45cm에서 두부 연결 방법이 힌지(H-5FS-5BS-t15)인 경우를 기준으로 강결(F-5FS-5BS-t15)인 경우의 수평변위와 수평변위비를 정리한 것이다. 수평변위는 두부와 배면지주의 연결 방법이 강결인 경우가 힌지인 경우의 17%~35%로 평균 26%만 발생함을 알 수 있다.

Table 13. Lateral displacement ratio of retaining wall showing the effect induced by fixed of heads (the inclination of front support=10°, vertical back support, the thickness of back support=15 mm)

| Excavation depth (cm) | H-10FS-0BS-t15 | F-10FS-0BS-t15 | Lateral displacement ratio (F-10FS-0BS-t15 / H-10FS-0BS-t15) |
|-----------------------|----------------|----------------|---|
| 30 | 0.260 | 0.065 | 0.25 |
| 35 | 0.755 | 0.125 | 0.17 |
| 40 | 1.695 | 0.265 | 0.16 |
| 45 | 4.150 | 0.675 | 0.16 |

Table 14. Excavation depth at failure showing the effect induced by fixed of heads (the inclination of front support=10°, vertical back support, the thickness of back support=15 mm)

| Contents | Excavation depth at failure (cm) | Excavation depth ratio at failure (F-10FS-0BS-t3 / H-10FS-0BS-t3) |
|----------------|----------------------------------|--|
| H-10FS-0BS-t15 | 33.4 | 1.0 |
| F-10FS-0BS-t15 | 43.8 | 1.31 |

Table 15. Lateral displacement ratio of retaining wall showing the effect induced by fixed of heads (the inclination of front support=5°, the inclination of back support=5°, the thickness of back support=15 mm)

| Excavation depth (cm) | H-5FS-5BS-t15 | F-5FS-5BS-t15 | Lateral displacement ratio (F-5FS-5BS-t15 / H-5FS-5BS-t15) |
|-----------------------|---------------|---------------|---|
| 20 | 0.060 | 0.015 | 0.25 |
| 25 | 0.118 | 0.040 | 0.34 |
| 30 | 0.240 | 0.085 | 0.35 |
| 35 | 0.635 | 0.125 | 0.20 |
| 40 | 1.420 | 0.235 | 0.17 |

Table 16은 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비를 나타낸 것이다. 분석 결과, 강결일 때 힌지일 때의 1.32배 더 깊은 굴착이 가능할 것으로 판단되었다.

5.1.4 전면지주가 0°이고, 배면지주가 10° 일 때(배면 지주 두께:15mm)

Table 17은 수평변위가 발생하여 비교 가능한 35~45cm에서의 굴착 깊이를 두부 연결 방법이 힌지(H-0FS-10BS-t15)인 경우를 기준으로 하여 강결(F-0FS-10BS-t15)인 경우와의 수평변위와 수평변위비의 관계를 정리한 것이다. 수평변위는 강결인 경우를 힌지인 경우와 비교하면 4%~11%로 평균 7%만 발생하여 두부를 강결로 하였을 경우 수평변위 감소 효과가 뛰어남을 알 수 있다.

Table 18은 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비의 관계를 나타낸 것이다. 분석 결과, 강결로 하였을 경우와 힌지로 하였을 경우를 비교하면 강결로 하였을 경우가 1.36배 더 굴착이 가능할 것으로 판단되었다.

5.2 두부 연결 방법에 따른 토압 감소 효과에 관한 분석

지반의 전단변형 해석 프로그램으로 IER 배면에서 발생하는 토압을 분석하였다.

Fig. 11은 굴착 깊이 50cm에서의 지반의 전단변형을

해석한 것이다. 실제 해석은 파괴 굴착 깊이에서 해석을 해야 하지만, 모래 지반에서 Rankine(1857)의 소성상태에 이르는 회전변위 기준인 0.00075를 적용하면 모형 IER의 높이가 70cm일 때 상부에서 수평변위는 0.53mm의 매우 작은 값으로 지반의 전단변형을 해석하기 쉽지 않기 때문에 IER의 전도는 발생하지 않고, 수평변위는 많이 발생한 굴착 깊이에서 지반의 전단변형 해석을 실시하였다.

지반의 전단변형 해석 결과에서 결정한 파괴면을 따라 발생하는 파괴토괴의 크기를 Fig. 12와 같이 Coulomb (1776), Korean Geotechnical Society(2015) 등 흙썰기 이론의 힘다각형을 식 (2)를 이용하여 정량적으로 토압을 산정하였다. 계산을 위해 Table 19와 같이 지반의 단위중량은 16.3kN/m³, 내부마찰각은 41.1°(Table 3)를 적용하였고, 목재의 벽면마찰각은 모형실험 시 측측을 통해 산정 가능하기 때문에 이 연구의 토압 계산에 사용된 벽면 마찰각은 콘크리트면의 경우에 보통 사용되는 벽면마찰각 범위의 1/2φ~2/3φ에서 보수적인 값 1/2φ로 가정하여 20.5°로 결정하였다. Table 20과 같이 전면지주가 5°이고 배면지주가 5°로 설치된 경우, 파괴면을 따라 파괴되는 토압의 크기는 강결(a)일 때 힌지(b)일 때의 27%가 감소하였고, Table 21과 같이 전면지주가 연직이고 배면지주가 10°도로 설치된 경우, 토압의 크기

Table 16. Excavation depth at failure showing the effect induced by fixed of heads (the inclination of front support=5°, the inclination of back support=5°, the thickness of back support=15 mm)

| Contents | Excavation depth at failure (cm) | Excavation depth ratio at failure (F-5FS-5BS-t15 / H-5FS-5BS-t15) |
|---------------|----------------------------------|---|
| H-5FS-5BS-t15 | 34.0 | 1.0 |
| F-5FS-5BS-t15 | 44.9 | 1.32 |

Table 17. Lateral displacement ratio of retaining wall showing the effect induced by fixed of heads (vertical front support, inclination of back support=10°, the thickness of back support=15 mm)

| Excavation depth (cm) | H-0FS-10BS-t15 | F-0FS-10BS-t15 | Lateral displacement ratio (F-0FS-10BS-t15 / H-0FS-10BS-t15) |
|-----------------------|----------------|----------------|--|
| 35 | 0.560 | 0.025 | 0.04 |
| 40 | 1.170 | 0.070 | 0.06 |
| 45 | 2.605 | 0.280 | 0.11 |

Table 18. Excavation depth at failure showing the effect induced by fixed of heads (vertical front support, the inclination of back support=10°, the thickness of back support=15 mm)

| Contents | Excavation depth at failure (cm) | Excavation depth ratio at failure (F-0FS-10BS-t15 / H-0FS-10BS-t15) |
|----------------|----------------------------------|---|
| H-0FS-10BS-t15 | 34.9 | 1.0 |
| F-0FS-10BS-t15 | 47.5 | 1.36 |

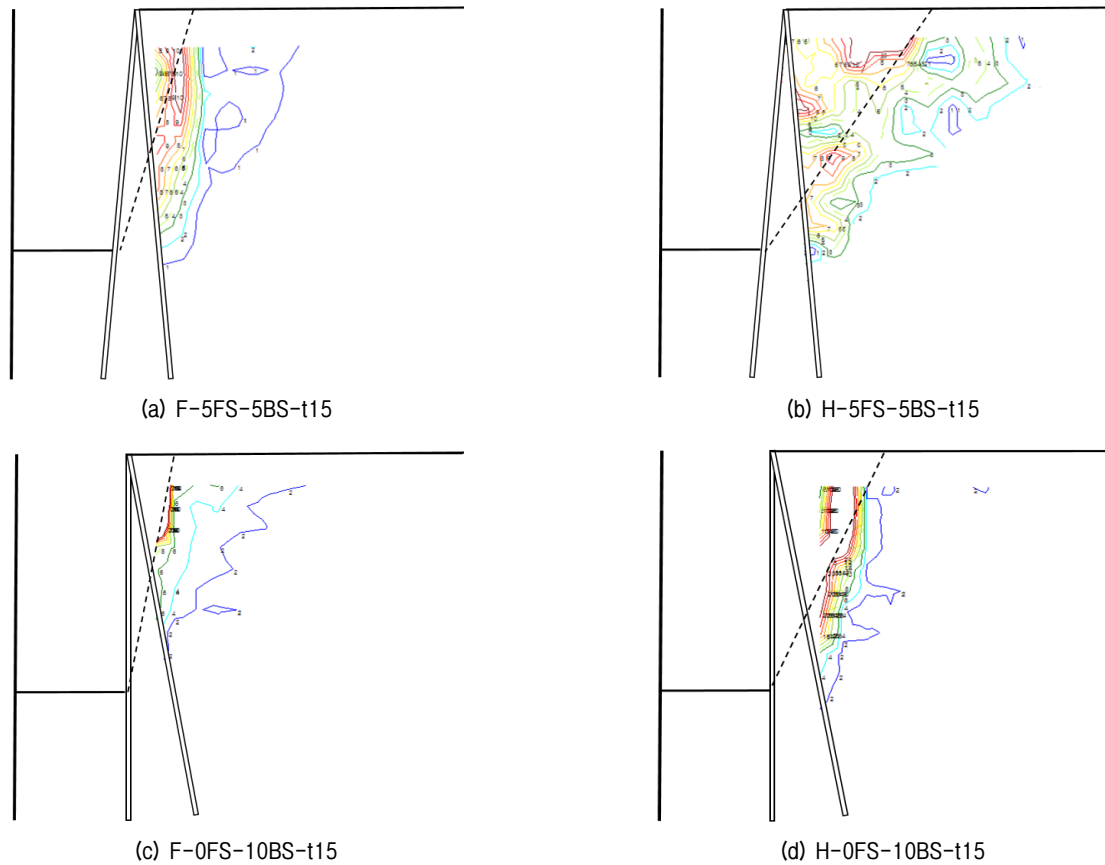


Fig. 11. Shear strain of ground at the excavation depth of 50 cm: (a) F-5FS-5BS-t15, (b) H-5FS-5BS-t15, (c) F-0FS-10BS-t15, (d) H-0FS-10BS-t15

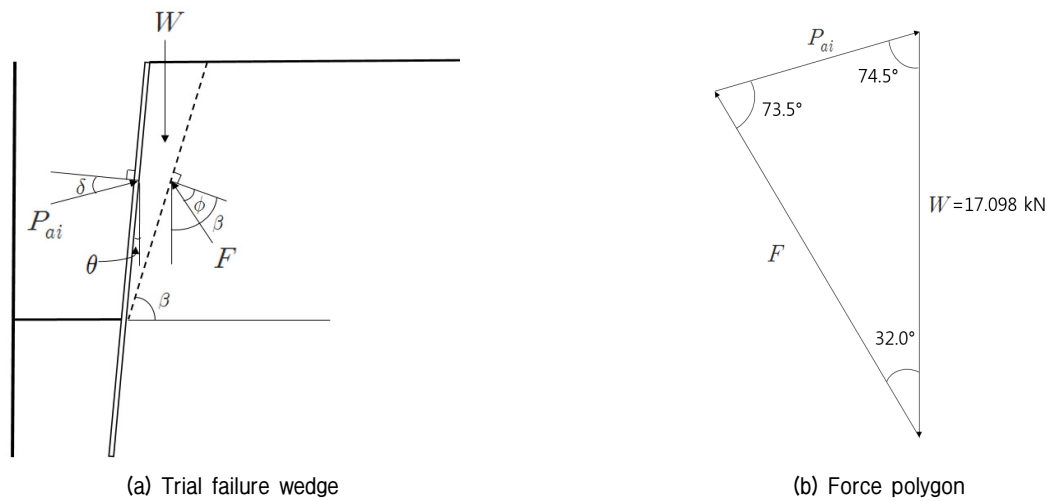


Fig. 12. Coulomb's active pressure (F-5FS-5BS-t15)

Table 19. Value of Applied geotechnical parameters (Coulomb's theory of earth-pressure)

| Contents | Unit weight, γ_t (kN/m^3) | Sliding mass of weight, W (kN) | Angle of failure plane, β ($^\circ$) | Wall friction angel, δ ($^\circ$) | Angle of wall face, θ ($^\circ$) | Internal friction angle, ϕ ($^\circ$) |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|--|
| F-5FS-5BS-t15 | 16.3 | 0.174 | 73 | 20.5 | -5 | 41.0 |
| H-5FS-5BS-t15 | 16.3 | 0.474 | 57 | 20.5 | -5 | 41.0 |
| F-0FS-10BS-t15 | 16.3 | 0.154 | 80 | 20.5 | 0 | 41.0 |
| H-0FS-10BS-t15 | 16.3 | 0.348 | 67 | 20.5 | 0 | 41.0 |

Table 20. Earth pressure ratio of retaining wall showing the effect induced by fixed of heads (the inclination of front support=5°, the inclination of back support=5°, the thickness of back support=15 mm)

| Contents | Excavation depth (cm) | Earth pressure (kN) | Earth pressure ratio (F-5FS-5BS-t15 / H-5FS-5BS-t15) |
|---------------|-----------------------|---------------------|---|
| F-5FS-5BS-t15 | 50 | 0.096 | 0.73 |
| H-5FS-5BS-t15 | 50 | 0.131 | |

Table 21. Earth pressure ratio of retaining wall showing the effect induced by fixed of heads (vertical front support, the inclination of back support=10°, the thickness of back support=15 mm)

| Contents | Excavation depth (cm) | Earth pressure (kN) | Earth pressure ratio (F-0FS-10BS-t15 / H-0FS-10BS-t15) |
|----------------|-----------------------|---------------------|---|
| F-0FS-10BS-t15 | 50 | 0.102 | 0.67 |
| H-0FS-10BS-t15 | 50 | 0.153 | |

는 강결(c)일 때 힌지(d)일 때의 33%가 감소하는 것으로 분석되어 IER의 두부 연결 방법을 강결로 하였을 경우, 파괴되는 토괴의 크기가 감소하여 배면에서 작용하는 토압도 크게 감소하는 것으로 판단된다.

$$\frac{W}{\sin(90^\circ + \theta + \delta - \beta + \phi)} = \frac{P_{aiR}}{\sin(\beta - \phi)} \quad (2)$$

6. 결론

본 연구에서는 IER의 강결과 힌지로 두부 연결 방법을 달리하여 수치해석, 실내모형실험 및 지반의 전단변형 해석을 수행한 결과 두부 연결 방법을 강결로 하는 것이 수평변위 억제 및 토압 감소에 효과적이고 구조적으로 안정하며, 결론은 다음과 같다.

- (1) IER 두부의 연결 방법을 강결, 힌지 그리고 자유단으로 하여 수치해석한 결과, 최대수평변위는 강결인 경우와 힌지인 경우를 비교하면 강결인 경우가 힌지인 경우의 12%가 감소하고 강결일 때와 자유단일 때를 비교하면 강결일 때 자유단일 때의 59%가 감소하는 것으로 분석되었다.
- (2) 실내모형실험 결과 전면지주의 각도를 10°, 5°, 0°의 순서로 변화시키고, 배면지주의 각도를 0°, 5°, 10°의 순서로 변화시켰을 때, 수평변위는 강결일 때 힌지일 때의 81.5%, 74%, 93%가 감소하였고, 파괴 굴착 깊이는 1.31배, 1.32배, 1.36배 더 굴착 가능한 것으로 분석되어 IER의 두부 연결 방법이 강결로 하였을 경우가 구조적으로 상당히 안정한 것으로 판단된다.
- (3) 지반의 전단변형 해석 프로그램을 이용하여 Coulomb

(1776)의 흙쌓기 이론의 힘다각형으로 토압의 크기를 정량적으로 분석한 결과, 전면지주와 배면지주의 각도가 모두 5°인 경우, 토압은 두부 연결 방법을 강결로 하였을 때 힌지로 하였을 때의 27%가 감소하는 것으로 분석되었고, 전면지주가 연직이고 배면지주의 각도가 10°인 경우, 토압은 두부 연결이 강결일 때 힌지일 때의 33%가 감소하는 것으로 분석되었다.

- (4) 수치해석과 실내모형실험을 통해서 IER의 두부 연결 방법을 강결로 하였을 때 수평변위감소 및 토압 감소에 효과적임을 확인하였으며, 실제 현장 시공 시 변위 억제를 위해서 두부 연결을 확실하게 고정하여 강결하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구 되었음.

참고문헌 (References)

1. Back, S. M., Im, J. C., Ahn, M. H., Joo, I. G., Jang, J. G., and Yoo, J. W. (2014), "Behaviour of the Inclined Earth Retaining Structure by Field Test (1) - with Respect to the Result of Inclinometer", *KGS Spring National Conference 2014*, Seoul, Korea, pp.817-825.
2. Canadian Geotechnical Society (1985), *Excavations and Retaining Structures*, Canadian Foundation Engineering Manual, Part 4.
3. Coulomb, C. A. (1776), "Essai sur Une Application des Règles de Maximis et Minimis à Quelques Problèmes de Statique, Relatifs a l'Architecture", *Mem. Roy. des Sciences, Paris, Vol.3*, pp.38.
4. Im, J. C. (2016), *A Guide for Soil Engineering 4th*, POD of CIR, Seoul, pp.393-394.
5. Jeong, D. U., Im, J. C., Yoo, J. W., Seo, M. S., Koo, Y. M., and

- Kim, S. J. (2013), "An Experimental Study on the Inclined Earth Retaining Structure in Clay", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.6, pp.63-75.
6. Ko, H. S., Im, J. C., Park, L. K., and Oh, M. L. (1996), "Model Tests on the Behaviour of Sandy Ground during Tunneling", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.1996, No.2, pp.371-374.
7. Koo, Y. M. (2012), *A Study on the Development of the Program to Analyze the Deformation on Model Ground*, M.S.Thesis, Pusan National University, pp.8-30.
8. Korean Geotechnical Society (2015). *Manual Guide for Design Criteria of Structural Foundation*, POD of CIR, Seoul, pp.442-455.
9. Park, L. K. (2003), *A Study on the Characteristic of Ground Behaviour and Settlement Restraining Effect of Micropile during Shallow Tunnel Construction in Soft Ground*, Ph.D. Thesis, Pusan National University, pp.110-147.
10. Rankine, W. M. J. (1857), "On Stability on Loose Earth", *Philosophic Transactions of Royal Society, London, Part I*, pp.99-110.
11. Seo, M. S., Im, J. C., Jeong, D. U., Yoo, J. W., Koo, Y. M., and Kim, G. H. (2012), "An Experimental Study on the Stability of Inclined Earth Retaining", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.12, pp.99-110.
12. Seo, M. S., Im, J. C., Kim, J. S., Baek, S. M., Kim, J. Y., and Kim, C. Y. (2015), "A Study on the Effect for Restraining Lateral Displacement of Inclined Earth Retaining Wall through the Field Experiment", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.3, pp.255-264.
13. Yoo, J. W., Im, J. C., Hwang, S. P., Kim, C. Y., Choi, J. H., and Kim, H. S. (2016), "An Experimental Study on the Stability of Assembled Earth Retaining Wall in Sandy Ground", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.2, pp.43-52.

Received : July 20th, 2016

Revised : August 10th, 2016

Accepted : December 7th, 2016