한국지반공학회논문집 제29권 6호 2013년 6월 pp. 63 ~ 75

ISSN 1229-2427
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2013.29.6.63

점토지반내의 IER 지주식 흙막이의 실험적 고찰

An Experimental Study on the Inclined Earth Retaining Structure in Clay

정 동 욱[1] Jeong, Dong-Uk
임 종 철[2] Im, Jong-Chul
유 재 원[3] Yoo, Jae-Won
서 민 수[1] Seo, Min-Su
구 영 모[4] Koo, Young-Mo
김 성 진[4] Kim, Sung-Jin

Abstract

Inclined Earth Retaining Structure Method (IER Method), was developed in order to improve the mechanical properties of the existing earth retaining method. IER consists of two supports, which are front and back supports. In the IER method, back support is very effective for the reduction of the earth pressure acting on the front support. In this study, the effects of back support and fixing conditions of lower ends of supports are analysed by laboratory model tests in clay. The test results show that back support reduces the Leteral displacement of IER effectively, and according to the results the effect of interval and fixing condition of back support was analysed.

요 지

기존의 흙막이 공법의 문제점을 보완하고 개선하기 위해서 새로이 고안한 공법이 지주식 흙막이공법이다. 지주식 흙막이 공법은 전면지주와 배면지주를 사항으로 설치하여 일체화시킨 가시설 공법으로, 배면지주의 설치로 인해 전면지주에 작용하는 토압을 효과적으로 분산시켜 가시설의 구조적인 안정성을 증대시킨 공법이다. 본 연구에서는 점토지반의 실내모형실험을 통해 배면지주의 설치 여부와 지주 하부의 고정 조건 등을 달리하여 지주식 흙막이 공법의 역학적 특성을 확인하였다. 실내모형실험결과 배면지주의 설치로 인해 IER 벽체의 수평변위가 효과적으로 감소하는 것으로 분석되었으며, 배면지주의 간격 및 고정 조건에 따른 효과가 분석되었다.

Keywords : Retaining wall, Inclined earth retaining structure method, Soft ground, Model test, Leteral wall displacement ratio

1. 서 론

산업화와 도시화로 인해 최근 건축물들은 대부분 고층화 대형화 되어 가고 있으며, 이로 인해 굴착심도가 깊어져 각종 보조 공법을 통해 가시설 구조물의 안정성을 확보하고 있다. 그러나 효율적인 토지이용을 위해 구조물들이 인접하여 시공되며, 이로 인해 대표적인 보조공법인 지반앵커 및 쏘일네일링과 같은 공법은 인접지반의 대지경계 침범과 구조물 기초말뚝의 간섭으로 인해 시공이 어려운 상황이 발생하고 있다. 또한 시공 부

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Research Assistant, Dept. of Civil Engng., Pusan National Univ.)
2 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engng., Pusan National Univ., imjc@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2442, Fax: +82-51-518-3084, 교신저자)
3 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engng., Pusan National Univ.)
4 비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engng., Pusan National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지 내에서 적용 가능한 보조공법으로는 버팀대 지지공법이 있는데, 이 공법은 작용하는 토압을 버팀대의 압축력으로 저항하도록 설계하기 때문에 버팀대의 개수가 많아져 대형 굴착의 경우 많은 양의 강재 사용으로 인해 공사비가 크게 증가하며. 또한 촘촘하게 배치된 버팀대는 굴착현장 내에서 중장비의 공사작업을 방해하는 매우 중대한 장애요인이 되고 있다.

상기의 문제점들을 개선한 여러 가지의 종류의 자립식 흙막이 공법이 있다. 그 중에서 억지말뚝을 이용한 자립식 흙막이 공법(2열 H-pile 공법, SSR공법)은 억지말뚝을 이용하여 활동 토괴에 대하여 역학적으로 저항하여 토압을 감소시키는 장점이 있다(Kim, 2006; Kim, 2009).

본 연구에서는 SSR공법보다 안정성이 높은 지주식 흙막이 공법(Inclined Earth Retaining Structure Method, 이하에서는 `IER 공법`으로 표기)이 개발되었으며, IER 공법은 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.

본 연구에 앞서 모래지반에서 실내모형실험을 진행하여 배면지주의 설치로 전면지주에 작용하는 토압감소로 인해 65%의 수평변위억제효과를 발생함을 분석하여, IER 공법의 구조적인 안정성을 확인하였다(Seo et al., 2012).

그래서 본 연구에서는 점토지반에서의 안정성을 분석하고자 실내모형실험을 통해서 배면지주의 설치, 간격, 지주 하부의 고정 등의 조건을 달리하여 실험을 실시하고, 실험 결과를 분석하여 수평변위억제를 통한 구조적 안정성을 분석하였다.

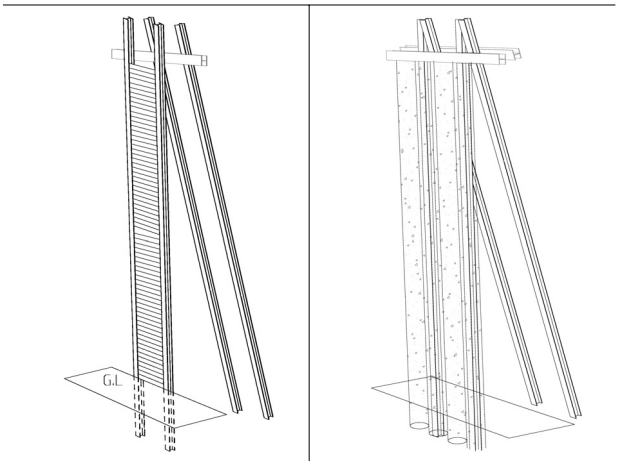
2. IER 공법

2.1 개요

IER 공법은 넝쿨식물을 기를 때의 지주를 기본 개념으로 적용하여 개발되었다. 전면지주와 배면지주를 현장여건에 따라 경사지게 설치하고 일체화하여 구조적 안정성을 확보한 공법이다. IER 공법의 특징은 배면지주의 설치로 인해 전면지주에 작용하는 토압을 감소시켜 지반앵커 또는 쏘일네일링 공법 등과 같은 보조공법 없이 일정 깊이에서 자립이 가능하도록 고안된 공법으로 최대 시공각도는 일반적으로 15° 내외인 것으로 조사되었으며, 구조 형태는 Fig. 1과 같이 다양하게 적용이 가능하다.

2.2 특징

IER 공법의 특징은 크게 4가지로 구분될 수 있는데 첫 번째로 연직굴착 보다 전면지주를 사항으로 설치함으로 Fig. 2의 (A)의 흙무게가 경감되어 토압이 감소되는 효과가 발생한다. 두 번째로 지주의 구조 형태인 전면지주와 배면지주의 강결로 인해 측방 변위가 억제되는 효과가 있으며, 세 번째로 배면지주와 지반의 마찰저



(a) Structural form of Dual support : front support (H-Pile+plate) | (b) Structural form of Dual support : front support (C.I.P)

Fig. 1. Applications of IER Method

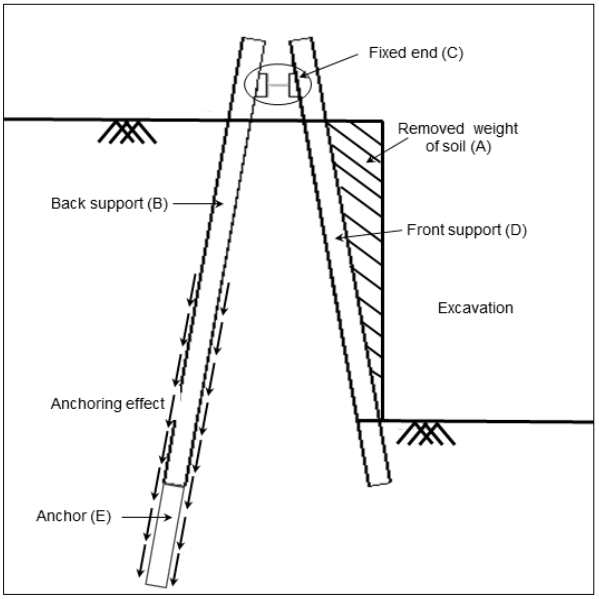


Fig. 2. Basic structure of IER Method

항으로 인해 앵커링(Anchoring)효과가 발생하여 구조적 안정을 더해준다. 마지막으로 배면지주의 억지말뚝효과로 인해 전면지주에 작용하는 토압을 감소시키는 효과가 있다. 또, Fig. 2의 (E)처럼 지반이 연약할 때 별도의 앵커를 설치할 수 있는 구조로 되어 있다.

2.3 모래지반에서의 거동 분석

본 연구인 점토지반의 거동을 분석하기 전에 모래지반의 거동을 분석하였다(Seo et al., 2012). 모래지반의 거동을 분석하기 위해 주문진 표준사를 이용하여, 평면변형률토조에서 모형실험을 실시하였다. IER 공법의 모형은 전면지주는 일체화된 벽체로, 배면지주는 말뚝으로 제작하고, 전면지주와 배면지주의 설치각도, 재료강성 등을 달리하였다. 그 결과, Fig. 3과 같이 이중지주식의 역학적 안정성이 확인되었다.

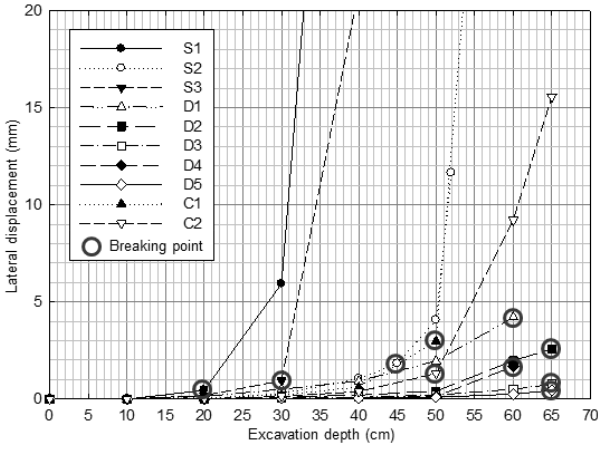


Fig. 3. Variation of tip Lateral displacement with excavation depth according to the case of experiments (Seo et al., 2012)

그 중 전면지주와 배면지주가 강성인 외지주식과 이중지주식의 수평변위와 수평변위비를 정리한 것이 Table 1이다. Table 1에서, 이중지주식이 외지주식에 비해 5% 만 수평변위가 발생함을 알 수 있다. 그래서 배면지주의 설치로 인해서 전면지주에 가해지는 토압을 상당히 많이 감소됨을 확인하였다.

3. 실내모형실험

3.1 실험장치

Fig. 4는 본 연구에 적용된 평면변형률 모형토조를 나타낸 것이다. 평면변형률 조건을 만족하기 위해 변형이 발생하지 않도록 두께 30mm의 투명아크릴로 벽체를 형성하였으며, 추가적으로 280×380mm 간격으로 보강을

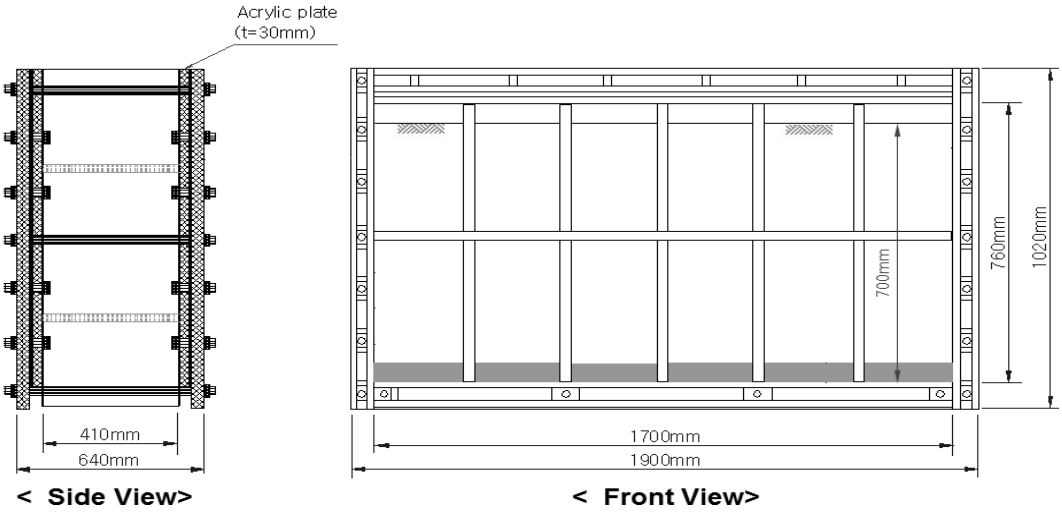


Fig. 4. Plane strain model soil-tank

Table 1. Results of model test in sand (selected from Seo et al. (2012))

Contents	Excavation depth (cm)	Excavation depth at failure (cm)	Tip Horizontal displacement when excavation 50 cm (mm)	Tip Horizontal displacement ratio when excavation 50 cm (mm)
Single support (rigid front support)	50	45	4.06	1
Duel support (rigid front support-rigid back support)	65	65	0.21	0.05

하여 길이방향 변형이 발생하지 않도록 장치를 제작하였다. 모형토조의 내부제원은 길이 1700mm, 높이 760mm, 폭 410mm이며, 지반의 조성은 해성점토를 이용하였다.

3.2 점토 시료

본 실험에 적용된 점토시료는 해성점토인 부산 신항 배후부지 준설토를 이용하였으며, KS F 규정에 의한 부산 신항 배후부지 준설토의 일반적인 물성치는 Table 2와 같다. 시험 결과로 해성점토는 통일분류법(USCS)에서 CL로 분류되었고, 자연 함수비는 45.99%로 분석되었다.

3.3 실험 조건 및 종류

IER 공법의 전면지주 및 배면지주의 모형은 Fig. 5와 같이 목재를 사용하여 제작하였다. 흙막이 전면은 전면지주와 토류판으로 구성되나 본 연구에서는 전면지주와 토류판을 분리하여 제작하지 않고 일체화된 벽체로 제작하여 실험하였다. 전면 및 배면지주의 연직길이는 70cm로, 조성된 지반의 높이와 같이 제작하였다. 지주들의 두께는 전면벽체는 12mm, 배면지주는 15mm로 제작하였다. 전면지주와 배면지주의 결합 시 일정한 각을 유지하기 위해서 연결더미를 제작하였다. Fig. 5는 실험 모형을 촬영한 사진이다. 모형토조실험은 상사성을 고려하기 위해 원심모형실험이 활용되고 있으나, 본 연구에서는 배면지주의 설치로 인한 거동을 무보강시와 단순 비교 검토하여 그 효과에 대한 경향성을 분석하고자 한다. 그러므로 정확한 배면지주의 거동에 관한 연구는 현장실험 및 계측을 통해 분석되어야 할 것으로 판단된다.

실험지반의 조성은 부산신항 웅동투기장에서 채취한 자연시료를 사용하였으며. 초기 함수비는 45.99%로 현장 함수비 상태로 모형실험시 배면지주의 뒷채움이 쉽지 않고, 인위적으로 뒷채움시 전면벽체의 변위를 유발하는 문제점이 발생하였다. 그러므로 모형실험이 용이한 실험함수비를 결정하기 위해 시료의 함수비를 증가시켜 제조하였으며, 함수비 85%에서 가장 최적의 모형지반을 조성할 수 있었다. 모형지반의 안정화를 위해 2일 가량 방치하였으며, 부직포를 물로 포화시켜 표면이 건조되는 것을 방지하였다. 또한 모형지반의 함수비의 변화를 측정하기 위해 실험종료 후 10cm간격으로 함수비를 측정하였다.

그 결과 실험에 사용된 점토지반의 함수비는 약 85±3%로 조성되었다.

점토지반의 비배수전단강도를 측정하기 위해 베인전단시험기가 사용되었으며, 본 연구에 사용된 베인전단시험기의 제원은 20×40mm이고, 측정범위는 0～130kPa

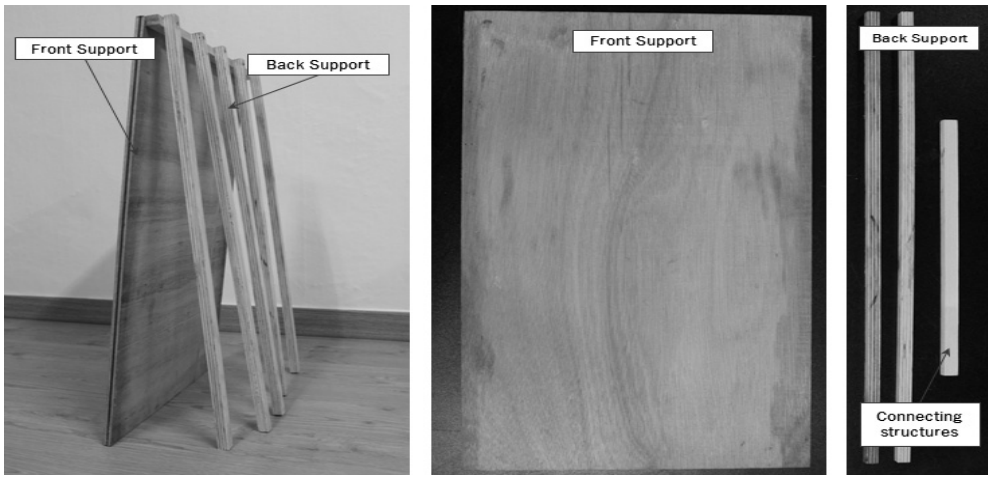


Fig. 5. Model earth retaining structures

Table 2. Properties of Marine clay

USCS	Unit weight (kN/m^3)	Specific gravity (G_s)	Natural water content (w_n, %)	Liquid limit (LL, %)	Plasticity index (PI)	Grain-size analysis
CL	17.4	2.66	45.99	43.39	21.82	Sand : 5.74%, Silt and Clay : 94.26%

이다. 베인전단시험은 함수비를 변화시켜 측정하였으며, 시료의 조성 후 2일 정도 안정화 시킨 다음 조성된 시료의 중간 깊이에서 측정하였다. 그 결과 함수비에 따른 비배수전단강도는 Fig. 6과 같다. 베인시험 결과 함수비 85%의 비배수전단강도는 3.2kPa로 산정되었으며, 지반조성 조건은 Table 3과 같다.

Table 4는 실험 종류별 실험 조건을 정리한 것이다. 실험은 무보강 상태인 Table 4의 SC1을 기준으로 진행하였으며, 배면지주의 설치, 배면지주의 설치 간격, 지주들의 고정 그리고 이중지주식의 전면지주의 경사에 따른 분석을 위해서 총 10가지를 실험을 실시하였다. 지주의 고정은 Fig. 7과 같이 지주의 하부에 목재와 철판으로 실시하였다.

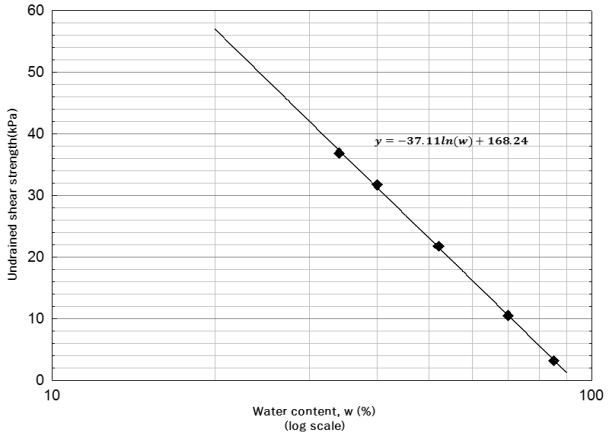


Fig. 6. Undrained shear strength according to the Water content

Table 3. Properties of model ground

Initial water content (%)	Deviation (%)	Undrained shear strength of Water content = 85% (kPa)
85	±3	3.2

3.4 실험 방법

IER 지주식 흙막이 모형을 평면변형률 토조에 설치하고, 벽체 배면과 전면의 토압차이가 발생하지 않도록 점토시료를 토조에 넣어 지반을 조성하였다. 또한, 점토시료를 깊이별로 일정한 함수비가 유지되도록 시료를 교반하여 이용하였다. 본 연구에서는 전면지주 및 배면지주의 효과를 확인하기 위한 실험으로 전면벽체 상단에서 1/100mm의 계측이 가능한 다이얼게이지를 이용하여 벽체의 좌, 우 수평변위를 측정하여 평균변위값으로 굴착고의 변화에 따른 벽체의 거동을 분석하였다. 지반의 굴착은 5cm씩 단계굴착을 수행하였으며, 굴착 직후 변위를 기준으로 계측기록을 하였다. 여기서, 굴착시의 점토의 팽창을 고려하여 일정하게 굴착하기 위해서, 첫 5cm 굴착 시의 무게를 측정하여 그 무게에 맞추어 굴착을 진행하였다.

각 실험 종류별 최종 굴착 깊이는 과다한 벽체의 수평변위 발생시점을 기준으로 종료하였다. Fig. 8은 모형을 설치하고 지반을 조성한 상태를 토조 정면에서 촬영한 사진이다.

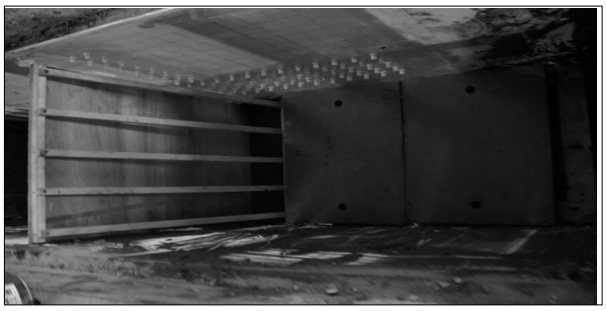


Fig. 7. Lower end fixed by bottom plate

Table 4. Type of model tests

No.	Form of support	Angle of front support (°)	Angle of back support (°)	Thickness of front support (mm)	Thickness of back support (mm)	Fixing conditions of back support	Back support interval (mm)
SC1	Single support	0	–	12	–	–	–
SC2		10	–	12	–	fixed front	–
DC1	Dual support	0	10	12	15	free	90
DC2		0	10	12	15	fixed back	90
DC3		0	10	12	15	free	40
DC4		0	10	12	15	fixed back	40
DC5		10	10	12	15	free	40
DC6		10	10	12	15	fixed back	40
DC7		10	10	12	15	fixed both	40
DC8		10	10	12	15	fixed front	40

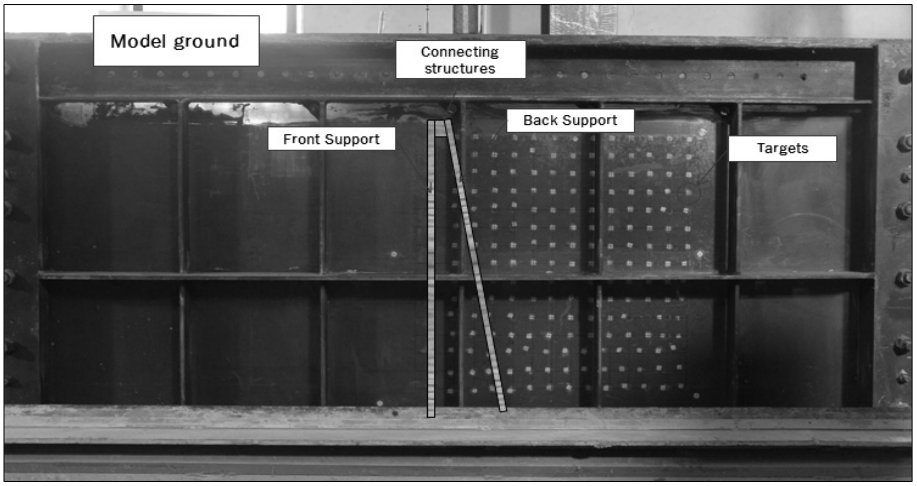


Fig. 8. After the model installation, process of excavation

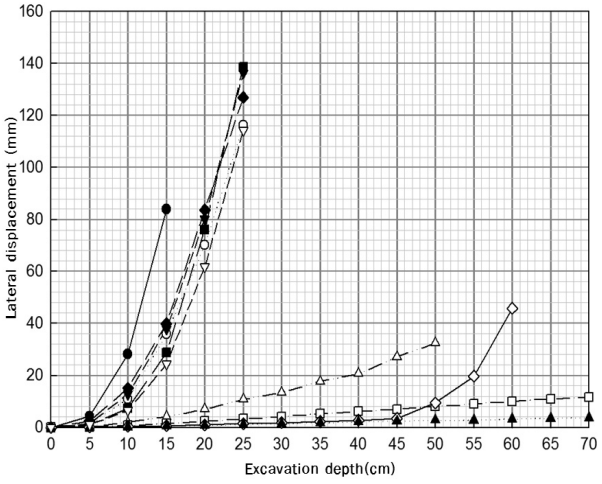


Fig. 9. Leteral displacement according to the excavation depth

3.5 실험 결과

3.5.1 수평변위

실험 종류별 측정한 좌, 우측의 벽체 선단의 수평변위를 평균하여 수평변위를 정리한 것이 Table 5이다. 그리고 Fig. 9는 굴착 깊이와 수평변위의 관계 그래프를 나타내고 있다.

3.5.2 파괴 굴착 깊이

파괴 굴착 깊이는 Table 6의 Rankine(1857)의 소성상태에 이르는 회전변위 기준을 적용하였으며, 본 실험에 해당되는 연약한 점토의 경우 0.02를 제안하고 있어 이

Table 5. Leteral displacement of during excavating

Excavation depth (cm)	Leteral displacement (mm)									
	SC1	SC2	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	DC6	DC7	DC8
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	4.4	1.4	1.4	0.0	1.0	0.2	2.4	0.1	0.0	1.0
10	28.2	10.8	12.8	2.0	7.4	0.7	15.1	0.4	0.2	6.5
15	84.0	35.9	37.8	4.1	28.8	1.4	40.0	0.7	0.4	24.3
20		70.2	80.2	7.0	76.2	2.3	83.7	1.0	0.8	61.9
25		116.3	136.4	10.8	138.8	3.3	127.0	1.5	1.1	114.3
30				13.5		4.2		1.9	1.5	
35				17.7		5.2		2.2	1.8	
40				20.6		6.1		2.7	2.1	
45				27.1		7.0		3.5	2.4	
50				32.4		8.1		9.4	2.8	
55						9.1		19.7	2.7	
60						10.0		45.7	3.2	
65						10.9			3.4	
70						11.7			3.6	

를 적용하였다.

Fig. 10은 식 (1)을 이용하여, 각 실험별 회전변위를 나타낸 것으로, 파괴기준과 만나는 점을 명확히 표현하기 위해 y축인 회전변위의 범위를 0~0.1로 제한하여 표시하였다.

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

Table 7은 파괴기준 0.02에 해당되는 파괴 굴착 깊이를 정리한 것으로, DC4와 DC7의 경우 파괴에 도달하지 않아 비파괴로 표현하였다. 그리고 파괴 굴착 깊이비를 계산할 경우 최종 굴착 깊이인 70cm를 파괴 굴착 깊이로 가정하여 계산하였다.

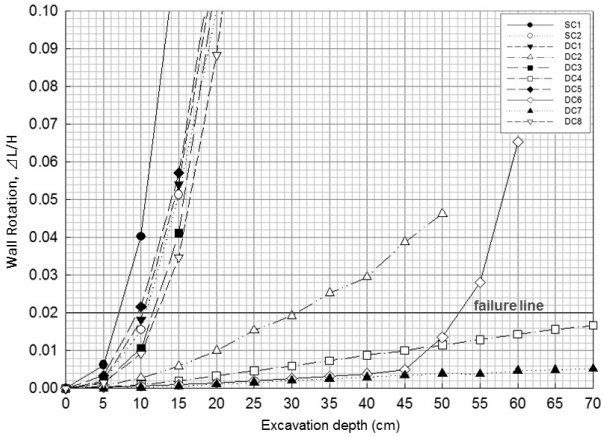


Fig. 10. Wall rotation according to the excavation depth

Table 6. Torsional 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 7. Excavation depth at failure

No.	Excavation depth at failure (cm)	No.	Excavation depth at failure (cm)
SC1	7	DC4	비파괴 (>70)
SC2	10.6	DC5	9.6
DC1	10.3	DC6	52.2
DC2	30.6	DC7	비파괴 (>70)
DC3	11.6	DC8	12.1

4. 실험 결과 분석

본 연구에서는 배면지주의 설치와 설치간격의 변화, 지주들의 하부 고정 유무와 전면지주의 설치각도에 따른 전면지주의 변위감소효과를 분석하였으며, 분석결과는 다음과 같다.

4.1 배면지주의 설치에 따른 거동 분석

배면지주의 설치에 대한 효과를 분석하기 위해서 전면지주의 설치각도(이하 '전면각'으로 표기)가 0°, 10°일 때로 나누어 분석하였다.

4.1.1 전면각이 0° 일 때

전면각이 0°인 전면지주의 하부를 자유단으로 하고, 배면지주의 설치가 다른 SC1, DC1, DC3를 비교분석하였다.

Table 8은 굴착 깊이 5, 10cm 일 때, 외지주식(SC1)을 기준으로 하여 수평변위비를 정리한 것이다. 배면지주 설치 시 수평변위가 33~45%만 발생함을 알 수 있다.

Table 9는 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비를 나타내고 있다. 그 결과 배면지주의 설치 시 1.5배 더 굴착이 가능한 것으로 판단되어졌다.

그리고 배면지주의 설치 간격에 따른 효과의 차이를 분석할 필요한 것으로 판단되어졌다.

4.1.2 전면각이 10° 일 때

전면각이 10°인 전면지주의 하부가 고정되어 있는 배면지주의 설치가 다른 SC2, DC7을 비교하였다.

Table 10은 굴착 깊이 5~20cm 사이의 수평변위비를

Table 8. Leteral displacement ratio when back support is installed (In the case that front support angle = 0°)

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio		
	SC1	DC1	DC3
5	1.00	0.33	0.22
10	1.00	0.45	0.26

Table 9. Excavation depth at failure when back support is installed (In the case that front support angle = 0°)

Contents	SC1	DC1	DC3
Excavation depth at failure	7	10.3	11.6
Excavation depth at failure ratio	1	1.47	1.66

정리한 것이다. 하부가 고정된 배면지주 설치 시 수평변위가 1~2% 발생하여 구조적으로 상당한 안정성을 보여주고 있다.

Table 11은 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비를 나타내고 있다. Table 11에서 배면지주의 설치 시 외지주식에 비해 6.6배 이상 굴착이 가능한 것으로 판단되어졌다.

그리고 지주들의 고정에 대한 효과 분석도 필요한 것으로 판단되어졌다.

4.2 배면지주의 설치 간격에 따른 거동 분석

4.1절의 배면지주의 설치에 대한 효과를 분석한 결과에서 배면지주의 설치 간격에 의한 차이가 발생함을 보여 전면각이 0°일 때, 배면지주의 고정의 유무를 나누어 설치 간격이 90mm, 40mm의 차이를 비교분석하였다.

4.2.1 배면지주의 하부가 자유단일 때

전면각이 0°이고, 배면지주의 하부가 자유단으로 설치 간격이 90, 40mm로 다른 DC1, DC3를 분석하였다.

Table 10. Leteral displacement ratio when back support is installed (In the case that front support angle = 10°)

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio	
	SC2	DC7
5	1.00	0.01
10	1.00	0.02
15	1.00	0.01
20	1.00	0.01

Table 11. Excavation depth at failure when back support is installed (In the case that front support angle = 10°)

Contents	SC2	DC7
Excavation depth at failure	10.6	>70
Excavation depth at failure ratio	1	6.6

Table 12. Leteral displacement ratio according to the interval of back support free lower part

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio	
	DC1	DC3
5	1.00	0.68
10	1.00	0.58
15	1.00	0.76
20	1.00	0.95
25	1.00	1.02

Table 12는 굴착 깊이 5~25cm 일 때의 수평변위비를 정리한 것이다. Table 13은 파괴 굴착 깊이비를 나타내고 있다. Table 12에서 보면 굴착 깊이 15cm까지는 설치 간격이 좁을수록 효과가 보여 진다. 하지만 Table 12에 굴착 깊이 15cm 이후는 파괴 시 거동임으로 설치 간격의 차이에 상관없이 비슷한 거동을 한다는 것을 알 수 있다.

4.2.2 배면지주의 하부가 고정단일 때

4.2.1절과 달리, 배면지주의 하부가 고정이고 설치 간격이 다른 DC2, DC4를 분석하였다.

Table 14는 굴착 깊이 25~45cm 사이의 수평변위비를 정리한 것이다. 설치 간격이 40mm 인 경우에 수평변위가 90mm 인 경우에 비해서 26~35%만 발생하는 것으로 분석되어졌다.

Table 13. Excavation depth at failure according to the interval of back support free lower part

Contents	DC1	DC3
Excavation depth at failure	10.3	11.6
Excavation depth at failure ratio	1	1.1

Table 14. Leteral displacement ratio according to the interval of back support fixed lower part

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio	
	DC2	DC4
25	1.00	0.30
30	1.00	0.31
35	1.00	0.29
40	1.00	0.30
45	1.00	0.26

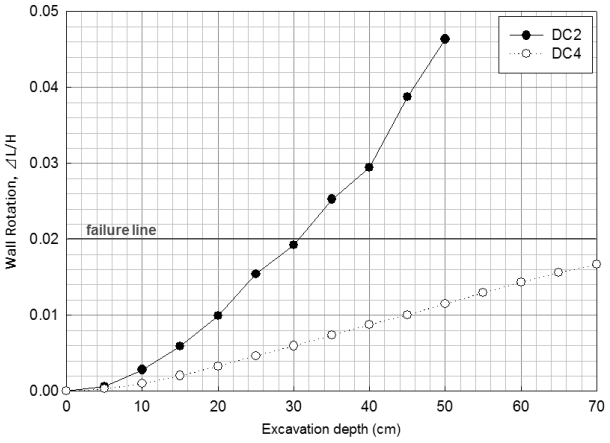


Fig. 11. Wall rotation according to the interval of back support fixed lower part

Table 15. Table of Fig. 11

Excavation depth (cm)	Wall rotation	
	DC2	DC4
25	0.015	0.005
30	0.019	0.006
35	0.025	0.007
40	0.029	0.009
45	0.039	0.010

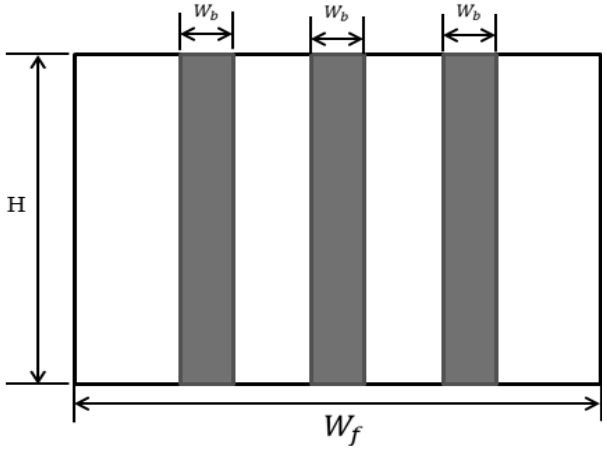


Fig. 12. Illustration of area ratio

Fig. 11 굴착 깊이에 대한 회전변위의 변화 그래프를 나타내고 있다. 또, Table 15는 굴착 깊이 25~45cm 일 때의 회전변위를 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 DC2는 30.6에서 파괴가 발생하고, DC4의 경우는 전면벽체에 따른 절대적인 수평변위의 값인 회전변위가 기준인 0.02 아래에 존재해서 변위 억제 효과가 나타나고 있다.

4.2.3 면적비에 대한 분석

배면지주의 설치 간격의 차이는 배면지주의 면적비로 표현할 수 있다. 면적비는 Fig. 12와 식 (2)를 이용하여 구해지고, 설치간격 90mm, 40mm일 때, 면적비는 18.3%, 36.6%이다.

$$\text{면적비}(\%) = \frac{\sum(\text{배면지주의 폭} \times H)}{\text{전면벽체의 폭} \times H} \times 100 \qquad (2)$$

Table 16은 실험 종류별 면적비를 나타내고 있다.

면적비의 분석은 실험 SC1을 기준으로 배면지주가 자유단인 DC1, DC3와 고정단인 DC2, DC4를 비교하여, 수평변위비와 파괴 굴착 깊이비의 면적비와의 관계를 분석하였다.

Table 16. Area ratio

Contents	DC1	DC2	DC3	DC4
Installation interval (mm)	90		40.00	
Area ratio (%)	18.3		36.60	
Back support fixed	Free	Fixed	Free	Fixed

Table 17. Leteral displacement ratio according to Area ratio

Area ratio (%)		0	18.3	36.6	10	100
Leteral displacement ratio	Free	0.99	0.41	0.26	0.56	0.11
	Fixed	1.00	0.04	0.02	0.08	0.01

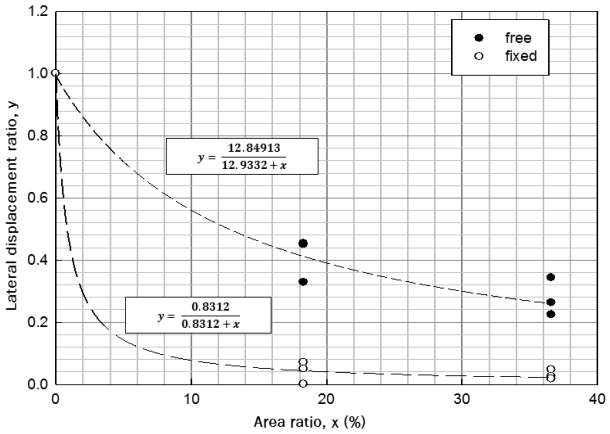


Fig. 13. The relationship between Area ratio (%) and Leteral displacement ratio

① 수평변위비와 면적비의 관계

Fig. 13은 면적비와 수평변위비의 관계 그래프이다. 그래프에서 점은 자유단과 고정단의 굴착 깊이 5~15cm의 수평변위비를 나타낸다.

그리고 점선은 자유단과 고정단일 때의 면적비에 따른 수평변위비의 변화를 나타내고 있다.

다음의 식 (3)은 실내실험결과를 분석하여 제안한 식으로, 그 식으로 면적비에 따른 수평변위비를 정리한 것이 Table 16이다.

$$\begin{cases} y = \dfrac{12.85}{12.93 + x} & : \text{자유단} \\ y = \dfrac{0.83}{0.83 + x} & : \text{고정단} \end{cases} \qquad (3)$$

여기서, x : 면적비(%)

y : 파괴굴착깊이비

② 파괴 굴착 깊이비와 면적비의 관계

Table 18은 면적비에 따른 파괴 굴착 깊이비를 정리한 것이고, Fig. 14는 면적비와 파괴 굴착 깊이비의 관계

Table 18. Excavation depth at failure ratio according to Area ratio

Area ratio (%)		0	18.3	36.6
Excavation depth at failure ratio	Free	1.00	1.47	1.66
	Fixed	1.00	4.43	10

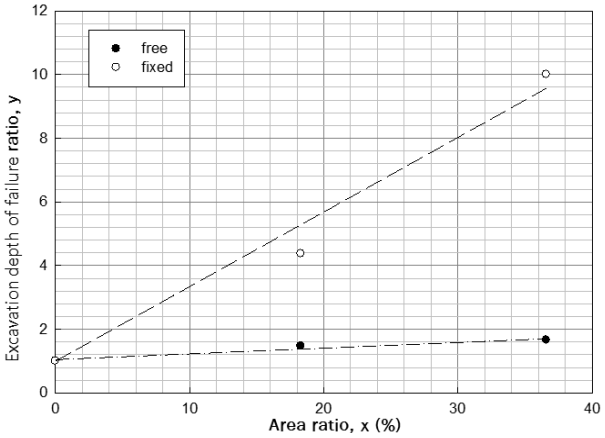


Fig. 14. The relationship between Area ratio (%) and Horizontal displacement ratio

그래프를 나타내고 있다. 그래프에서 점은 자유단과 고정단의 파괴 굴착 깊이비를 나타내고, 점선은 자유단과 고정단일 때의 면적비에 따른 파괴 굴착 깊이비의 변화를 나타내고 있다. 실험결과 전면지주 및 배면지주가 자유단일 경우, 면적비의 증가에 따른 파괴 굴착 깊이비의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 고정단일 경우 면적비의 증가에 따라 파괴 굴착 깊이비가 선형적으로 증가하는 것으로 나타나 IER 공법을 점토지반에 적용시 배면지주의 면적비 효과를 극대화시키기 위해, 전면지주 및 배면지주를 구속시키는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

4.3 지주의 고정에 따른 거동 분석

4.1.2절의 전면각이 10°일 때의 배면지주의 설치에 대한 효과를 분석한 결과에서 배면지주의 고정됨으로서 수평변위가 상당히 적게 발생함을 보여 전면각이 0°, 10°일 때, 지주들의 고정의 차이가 IER 공법의 점토지반에서의 안정성에 어떤 영향을 주는지 분석하였다.

4.3.1 전면각이 0°일 때

전면각이 0°이고 하부가 자유단이면서, 배면지주의 설치 간격이 90mm 같고 배면지주의 하부의 고정의 유무가 다른 DC1, DC2를 분석하였다.

Table 19. Leteral displacement ratio according to back support fixed (In the case that front support angle = 0°)

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio	
	DC1	DC2
5	1.00	0.00
10	1.00	0.15
15	1.00	0.11
20	1.00	0.09

Table 20. Excavation depth at failure ratio according to back support fixed (In the case that front support angle = 0°)

Contents	DC1	DC2
Excavation depth at failure	10.3	30.6
Excavation depth at failure ratio	1	2.97

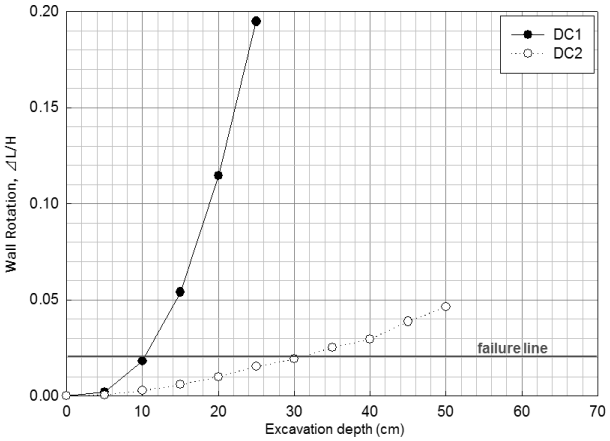


Fig. 15. Wall rotation according to back support fixed (In the case that front support angle = 0°)

Table 19는 굴착 깊이 5～20cm 일 때의 수평변위비를 정리한 것이다.

Table 19에서 배면지주의 고정 시 수평변위가 자유일 때의 수평변위 발생량에 비해서 약 9～15% 발생하였고, 굴착 깊이가 더 깊어질수록 그 수평변위비가 더 작아짐을 보여주고 있다.

Fig. 15는 굴착 깊이와 회전변위의 관계 그래프를 나타낸 것이다. 또, Table 20은 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비를 정리한 것이다.

그 결과 배면지주의 고정이 자유단 일 때보다 약 2.97배에 더 많이 굴착이 가능하다.

4.3.2 전면각이 10°일 때

본 절에서는 전면각이 10°인 이중지주식에 배면지주의 설치 간격을 40mm로 설치하여, 전면지주와 배면지주의 하부가 고정유무에 따라 다르게 실험한 DC5～

DC8의 총 4가지를 비교 분석하였다.

Fig. 16은 굴착 깊이별 수평변위 그래프를 나타내고, Table 21은 굴착 깊이 5～20cm 사이의 수평변위비를 정리한 것이다.

Fig. 16과 Table 21에서 보면, 지주들의 하부가 양단 자유와 전면지주만 고정일 때 비슷한 거동을 하고 양단 고정과 배면 고정일 때 일정한 굴착 깊이까지는 같은 거동을 한다는 것을 알 수 있다.

특히, 양단 고정의 경우에 양단 자유에 비해서 수평변위가 1%만 발생하는 것으로 분석되었고, 배면만 고정되어 있더라도 일정 굴착 깊이까지는 양단 자유에 비해서 최대 5%만 발생하고 굴착 깊이가 깊어질수록 더 효과적인 것을 확인 할 수 있었다.

Table 22는 파괴 굴착 깊이와 파괴 굴착 깊이비를 나타내는 것이다.

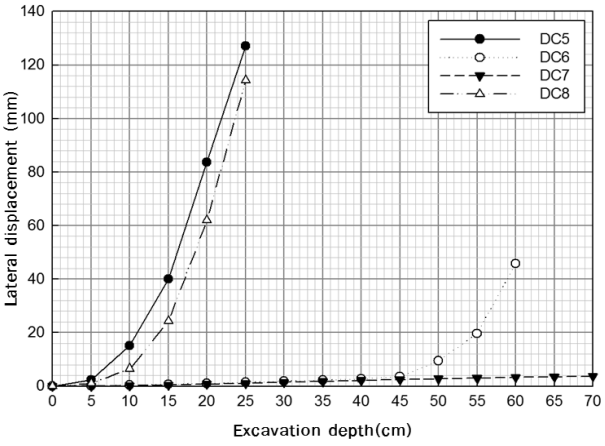


Fig. 16. Leteral displacement according to back support fixed (In the case that front support angle = 10°)

Table 21. Leteral displacement ratio according to back support fixed (In the case that front support angle = 10°)

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio			
	DC5	DC6	DC7	DC8
5	1.00	0.05	0.01	0.42
10	1.00	0.03	0.01	0.43
15	1.00	0.02	0.01	0.61
20	1.00	0.01	0.01	0.74

Table 22. Excavation depth at failure ratio according to back support fixed (In the case that front support angle = 10°)

Contents	DC5	DC6	DC7	DC8
Excavation depth at failure	9.6	52.2	70	12.1
Excavation depth at failure ratio	1.00	5.44	7.29	1.26

Table 22에서 양단 고정이 가장 뛰어난 효과를 보여주고 있고, 배면지주만 고정되어도 일정 굴착 깊이까지는 안정적인 거동을 보여줌을 확인하였다.

실험 결과로 고정의 효과를 확인하였고, 특히 전면지주의 고정에 비해서 배면지주의 고정의 효과가 상당함을 알 수 있었다. 그리고 일정 깊이까지 굴착을 한다고 하면 배면지주의 고정만으로도 상당한 효과를 볼 수 있었고, 그 굴착 깊이를 넘어서는 전면부의 점토의 양이 줄어들어 전면지주의 근입 심도가 짧아져 히빙에 의한 전면지주의 상승에 의한 파괴가 발생하는 것으로 판단되어졌다.

4.4 이중지주식의 전면지주 경사에 따른 거동 분석

본 절에서는 이중지주의 형태 중에서 전면지주가 연직일 때와 경사가 진 경우에 어떤 차이가 있는지 분석하고자 한다. 그래서 전면각이 0°, 10°일 때를 비교하여 경사가 미치는 영향을 분석하였다.

4.4.1 배면지주의 하부가 자유단일 때

배면지주의 하부가 자유단이고, 설치 간격이 40mm인 이중지주식의 전면각이 0°, 10°로 다른 DC3, DC5를 분석하였다.

Fig. 17은 굴착 깊이에 따른 수평변위 그래프를 보여주고 있고, Table 23은 굴착 깊이 5～20cm일 때의 수평변위비를 나타내고 있다.

Fig. 17과 Table 23에서 전면각이 0°일 때 10°에 비해서 낮은 굴착 깊이에서는 40～50% 작은 수평변위를 보여줘 조금 안정한 것처럼 보이나, 거의 비슷한 거동을

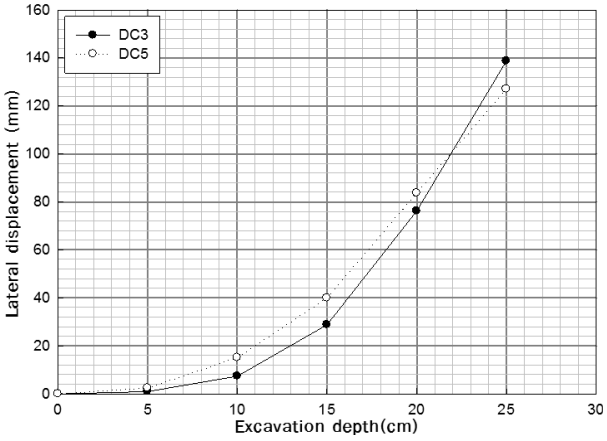


Fig. 17. Leteral displacement according to the installation angle of front support (lower part free of back support)

Table 23. Leteral displacement ratio according toinstallation angle of front support (lower part free of back support)

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio	
	DC3	DC5
5	0.41	1.00
10	0.49	1.00
15	0.72	1.00
20	0.91	1.00

Table 24. Excavation depth at failure ratio according to installation angle of front support (lower part free of back support)

Contents	DC3	DC5
Excavation depth at failure	11.6	9.6
Excavation depth at failure ratio	1.00	0.83

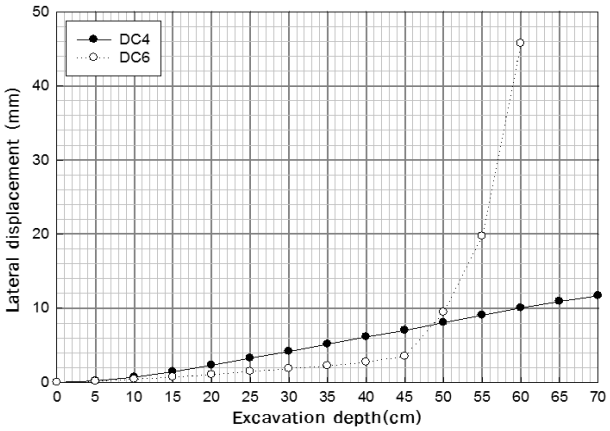


Fig. 18. Leteral displacement according to installation angle of front support (lower part fixed of back support)

한다고 할 수 있겠다.

Table 24는 파괴 굴착 깊이비를 나타내고 있다. Table 24에서 파괴 굴착 깊이비를 비교해 보면 연직인 경우에 비해 경사진 경우가 83%만 굴착이 가능한 것으로 판단되어 진다.

4.4.2 배면지주의 하부가 고정단일 때

4.4.1절과 달리 배면지주의 하부가 고정되어 있을 때에 경사에 의한 거동의 차이를 보기 위해서 배면지주가 고정되어 있고, 설치 간격이 40mm로 전면각이 다른 DC4, DC6을 비교하였다.

Fig. 18은 굴착 깊이에 따른 수평변위 그래프를 보여주고 있다. 굴착 깊이 45cm까지는 DC6이 수평변위가 작으나 그 이상에서는 수평변위 발생의 기울기가 급해짐을 알 수 있다.

Table 25는 굴착 깊이 30～50cm일 때의 수평변위비

Table 25. Leteral displacement ratio according to installation angle of front support (lower part fixed of back support)

Excavation depth (cm)	Leteral displacement ratio	
	DC4	DC6
30	1.00	0.44
35	1.00	0.43
40	1.00	0.44
45	1.00	0.50
50	1.00	1.17

Table 26. Excavation depth at failure ratio according to installation angle of front support (lower part fixed of back support)

Contents	DC4	DC6
Excavation depth at failure	70	52.2
Excavation depth at failure ratio	1.00	0.75

를 나타내고 있다. Table 25에서 45cm 이전에 경사진 이중지주식이 연직에 비해서 40～50%의 수평변위가 발생함을 알 수 있다.

Table 26은 파괴 굴착 깊이비를 나타내고 있다. Table 26에서 파괴 굴착 깊이비를 비교해 보면 연직인 경우에 비해 경사진 경우가 75%만 굴착이 가능한 것으로 분석되어 졌고, 그 원인은 토압 감소효과보다는 수동영역의 감소에 의한 저항력 부족이 더 크게 영향을 미치는 것으로 판단되어졌다.

5. 결 론

IER 공법의 구조적 안정성을 확인하기 위해 점토지반에서 실내모형실험이 수행되었으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 전면지주 및 배면지주의 자유단 조건에서 외지주식과 이중지주식을 비교분석한 결과 배면지주의 설치로 인해 수평변위는 54～68% 감소하는 것으로 분석되었다.
(2) 전면지주가 자유단일 때, 배면지주의 면적비가 2배 증가할 경우 배면지주가 자유단이면 수평변위가 24～42%, 고정단이면 69～74% 감소하는 것으로 분석되었다.
(3) 실험 결과를 분석하여, 점토지반에서의 실험 결과를 분석하였으며, 면적비(x)에 따른 수평변위비(y)의 관계식을 제안한다.
(4) 연직벽체의 양단 자유단, 배면 고정단을 비교분석

한 결과 배면고정으로 인해 수평변위는 85~91% 감소하는 것으로 분석되었고, 전면이 경사진 이중 지주식의 전면지주 및 배면지주의 하부 조건을 고정단 또는 자유단으로 실험한 결과 수평변위 억제 효과는 양단고정, 배면고정, 전면고정, 양단 자유 순으로 분석되었다.

(5) 벽체의 경사에 따른 수평변위 억제효과를 분석한 결과 양단 자유단일 경우 벽체의 경사로 인해 오히려 수평변위가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전면벽체의 수동토압감소로 인해 발생한 것으로 분석된다. 그러므로 점토지반에서 IER공법을 적용할 때에 양단 자유단으로 시공하는 경우에는 전면지주를 연직으로 유지하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 그러나 양단고정일 경우 전면벽체의 경사로 인해 수평변위는 40~50% 감소하는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. Kim, C. Y. (2006), *Development of the Analyzing Method and the Designing Program for Earth Retaining Cantilever Walls using Stabilizing Pile*, Unpublished master's degree, Pusan National University, pp.33-42.
2. Kim, T. H. (2009), *An Experimental Study on the Behavior of Earth Retaining Wall using self supported Stabilizing piles*, Unpublished master´s degree, Pusan National University, pp.90-225.
3. Rankine, W.M.J. (1857), "On Stability on Loose Earth", Philosophic Transactions of Royal Society, London, Part I, 9-27.
4. 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 Koeran Geotechnical Society*, Vol.28, No.12, pp.99-110.

(접수일자 2013. 4. 25, 심사완료일 2013. 6. 11)