

연약점토지반에 설치된 IER 지주식 흠막이의 효과적인 수평변위억제 방법에 관한 연구

A Study on the Effective Restraint Method of Lateral Displacement of an Inclined Earth Retaining Structure in Soft Clay

김 자 영 ¹	Kim, Jayoung	임 종 철 ²	Im, Jong-Chul
서 민 수 ³	Seo, Minsu	김 창 영 ³	Kim, Changyoung
박 은 경 ⁴	Park, Eun Kyeong	박 태 건 ⁵	Park, Tae Keon

Abstract

A self-supported temporary excavation method called Inclined Earth Retaining structure (IER) has been developed by improving an existing excavation method. The stability of the IER was proved with both model tests and field tests. Especially, the results of the model tests proved that the lateral displacement of a model retaining wall was significantly reduced in clay. In this study, the applicability of the IER installed in the soft clay ground is estimated by analyzing survey data collected in the construction field. The results of FE analysis show that the lateral displacement of the IER decreased by 70.9% of that of a single row, self-supported retaining wall using the same number of H-piles. Thus, using the IER method in the soft clay ground will increase the stability of the excavated ground with the effect restraining its lateral displacement. Furthermore, using Deep Cement Mixing (DCM) to the upper half embedded depth of front support is recommended as a subsidiary method of reducing the lateral displacement of IER in the soft clay ground based on FE analysis results.

요 지

기존 흠막이 공법을 개선함으로써, 자립이 가능하게 IER공법이 개발되었다. IER 공법의 안정성은 실내모형실험과 현장실험을 통해서 확인되었다. 특히, 점토지반에서의 실내모형실험의 결과 상당한 변위 감소효과를 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 IER을 점토지반에 실제 적용하여 계측데이터를 수집하였으며, 이것을 이용하여 연약점토지반에서의 적용성에 대해 분석하였다. 그리고 수치해석을 통해 동일한 개수의 H-pile이 적용된 일열 H-pile 흠막이에 비해서 IER 공법의 수평변위가 70.9% 감소하는 것을 확인하였다. 그러므로 IER 공법을 연약점토지반에 적용하면 높은 수평 변위억제효과로 인해 지반의 안정성은 상당히 많이 증대될 것으로 판단된다. 또, 점토지반에서의 수평변위억제방법으

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ.)
2 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ., Tel: +82-51-510-2442, Fax: +82-51-518-3084, imjc@pusan.ac.kr, Corresponding Author, 교신저자)
3 정회원, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원, 공학박사 (Member, Ph.D, Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ.)
4 비회원, 경상남도 창원시 진해구청 안전건설과, 공학석사 (Jinhae-gu office in Changwon)
5 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

로 전면지주의 근입부에 DCM보강을 제안하여, 수치해석을 통해 DCM 최적의 보강위치를 분석하였다. 그 결과, 굴착 저면에서 전면지주의 근입부의 중간지점까지 DCM 보강하는 것을 제안하였다.

Keywords : Inclined Earth Retaining Structure, Soft clay, Applicability, Restraint effect of lateral displacement

1. 서론

지하굴착을 하기 위해 적용되고 있는 흠막이 공법에는 지지체로서 앵커나 버팀대가 많이 사용되고 있다. 그러나 이런 방법은 여러 가지 단점을 가지고 있다. 버팀대 지지공법은 버팀대의 압축력으로 저항하도록 설계되므로 버팀대의 개수가 많아져 공사비의 증가와 굴착 시에 중장비의 작업에 방해가 되고 본 공사 시에도 많은 지장을 초래하고 있다. 또, 앵커는 정착을 위해 인접 부지를 점유하고, 시공과정과 해체과정에서 많은 시간적인 지체가 발생하게 된다.

단점들을 보완하고자 사면안정용 억지말뚝의 효과를 적용하여 개발된 지주식 흠막이 공법(Inclined Earth Retaining Structure Method, 이하 'IER 공법'으로 표기)은 억지말뚝(이하 '전면지주'로 표기)과 억지말뚝(이하 '배면지주'로 표기)을 경사지게 설치하여, 구조적으로 일체화시킨 공법이다(Fig. 1 참조). 이 공법은 배면지주의 설치로 인해 전면지주에 작용하는 토압을 경감시키고, 경사지게 설치된 지주들의 결합에 의해서 구조적 안정성을 확보할 수 있는 장점이 있다.

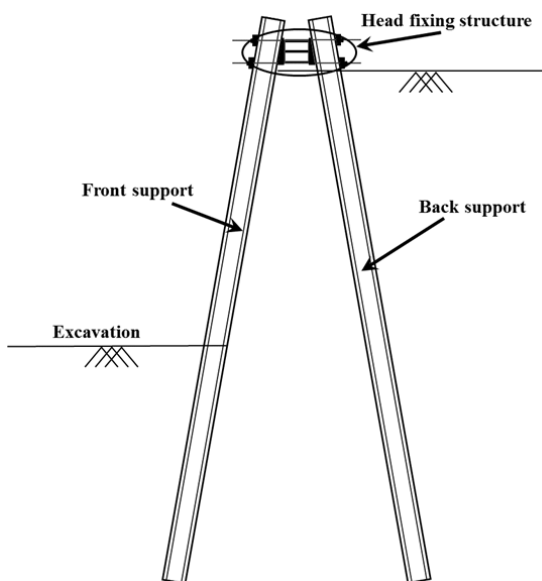


Fig. 1. Basic structure of IER method

IER 공법의 수평변위억제효과를 확인하기 위해서 Seo et al.(2012)은 주문진표준사를 이용하여 조성한 모래지반에서 배면지주의 설치 유무를 달리한 실내모형실험을 실시하였다. 그 결과, 동일한 40cm 굴착에서 수평변위는 배면지주가 설치된 경우(Double support, 이중지주식)는 0.088mm, 설치되지 않은 경우(Single support, 외지주식)는 1.045mm 발생하여, 이중지주식이 외지주식에 비해 수평변위가 92% 감소하는 것으로 분석되었다. 그리고 Jeong et al.(2013)은 점토지반에서의 안정성을 확인하고자 해성점토를 이용하여 점토지반을 조성하여, 배면지주의 설치 유무와 지주들의 하부 고정 등을 달리하여 실내모형실험을 실시하였다. 실험결과 중에서 굴착 깊이가 5cm 일 때의 측정된 수평변위는 외지주식(Single support)이 4.4mm이고, 배면지주의 하부가 자유단인 이중지주식(Double support ①)은 1.4mm, 배면지주의 하부가 고정된 이중지주식②(Double support ②)은 0.0mm로 계측되어, 이중지주식①은 외지주식에 비해서 수평변위가 32%만 발생하고, 이중지주식 ②는 수평변위가 발생하지 않았다. 그 결과로 IER 공법을 점토지반에 적용하면 수평변위를 크게 억제할 수 있을 것으로 판단되었다. 또 Seo et al.(2016)에서 실제 IER 공법이 적용된 점토지반에서의 현장실험의 결과를 분석하여, 배면지주의 안정성 증대효과를 확인함과 동시에 용접으로 결합시킨 지주가 불량할 경우에 과도한 변위가 발생함을 발견하였다. 마지막으로 Seo et al.(2015)은 지주의 결합을 보다 안정적으로 할 수 있는 방안으로 두부체결구가 소개되었고, 배면지주의 설치 유무와 설치간격을 달리하여 현장실험을 실시하였다. 현장실험의 결과로 배면지주의 설치로 인해서 수평변위는 최대 78% 정도만 발생하였으며, 성토저면에서 높이가 높아질수록 효율성은 증가하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 IER 공법의 연약점토지반에서의 안정성을 확인하기 위해서 현장실험을 실시하였다. 그리고 현장 계측 결과를 이용하여, 현장의 지반 상태를 수치해석을 통해서 재현하고, 재현된 지반에서 IER 공법과 단위길이 당 H-pile 설치 개수가 다른 일열 H-pile 흠막이

들과의 안정성 차이를 수치해석을 통해 분석하여, IER 공법의 수평변위억제효과를 분석하고자 한다. 또, 연약 점토지반에서의 변위를 보다 효과적으로 억제하기 위한 방안을 제안하고자 한다.

2. 현장 거동 분석

2.1 현장적용의 개요

현장 거동을 분석하기 위해서 ‘양산 ○○ 아파트’ 건설공사의 흠막이에 IER 공법을 적용하였다. 그리고 지주의 결합방법은 용접볼량등과 같은 문제를 방지하기 위해서 두부체결구를 적용하였다. 현장 지반은 Table 1 과 같이, 매립층, 모래층 및 점토층으로 구성되어 있고, 그 중에서 매립층과 모래층은 굴착저면까지만 영향을 미치고 실제 IER 공법을 지지하는 지층은 연약점토층(N=1)이다. 또한 지하수위가 매립층 내에 있음을 고려하여, 전면지주의 구조형식은 H-pile(250×250×9×14)과 토류판으로 하고 차수를 하기 위해 LW그라우팅(Labileless Wasser glass Grouting)으로 설계하였다. 최종적으로 현장에 적용된 IER 지주식 흠막이 제원은 Table 2와 같다.

2.2 현장 시공 사진

Fig. 2는 현장사진으로 Fig. 2(a)는 띠장과 배면지주를 두부체결구를 사용하여 결합시킨 모습이고, Fig. 2(b)는 IER 공법이 적용되어 시공 후 최종 굴착이 완료된 모습이다.

2.3 현장 계측 결과 및 분석

전면지주의 2개소에 지중경사계(Fig. 3 참조)를 설치하여 흠막이의 변위를 계측하였다. Fig. 2(b)가 촬영된 위치가 지중경사계 I-1이 설치된 지역으로, 이 지역부터 굴착을 시작하였다. 계측은 2015년 6월 30일의 값을 초기값으로 설정하여 2015년 9월 09일까지 주1회 실시하였다.

경사계 I-1의 경우 굴착 초기인 2015년 7월 22일에 굴착 깊이인 6m의 1/200인 30cm보다 큰 31.80mm의 변위가 발생하여, 과도한 변위가 발생할 가능성이 있어 굴착을 중지하고 원인을 분석하여 보강을 하기 위해서 현장 실태를 파악하였다. 그 결과, 변위 발생 원인으로 배면부에서의 하수의 유입과 배면지주의 뒤편 흠막이 불량의 의한 것으로 판단되었다. 그래서 I-3가 설치된 지역의



(a) Head fixing structure



(b) Construction site after excavation

Fig. 2. Construction field of field test site

Table 1. Ground profile of field test site

Hole No.	Reclaimed layer (m)	Sand layer (m)	Clay layer (m)
BH-8	0~4.7	4.7~6.0	6.0~23.70

Table 2. Design parameters of earth retaining structure of field test site

Excavation depth (m)	Installation angle (°)		Interval (m)		Structure of front & back support	Type of front support
	Front support	Back support	Front support	Back support		
6.0	0	10	1.5	1.5	H-250×250×9×14	H-pile+timber plate+LW Grouting

경우는 굴착 전에 뒤채움을 보강하고, 하수 유입을 차단 하였다.

Fig. 4는 지중경사계(I-1과 I-3)의 굴착 완료 시인 2015년 7월 29일부터 2주간씩을 정리한 것이다. Fig. 4에서 최상단의 최종 누적변위는 I-1은 37.55mm, I-3는 20.86mm로 측정되었다. 그리고 굴착하기 전에 배면지주의 뒤채움을 한 I-3의 최종수평변위는 I-1과 비해서 수평변위 발생량이 44.4%정도 감소한 것으로 계측되었다.

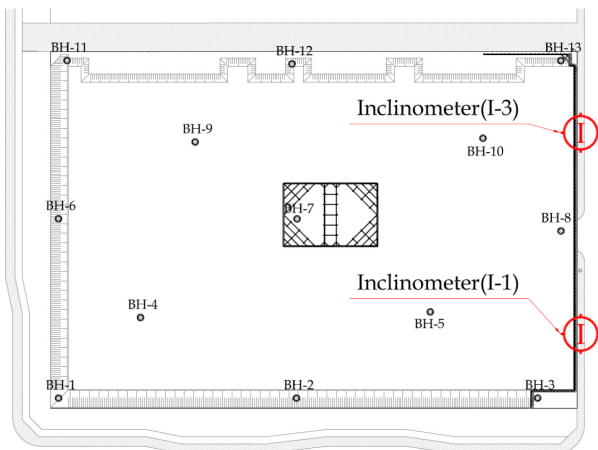


Fig. 3. Position of inclinometer in field test site

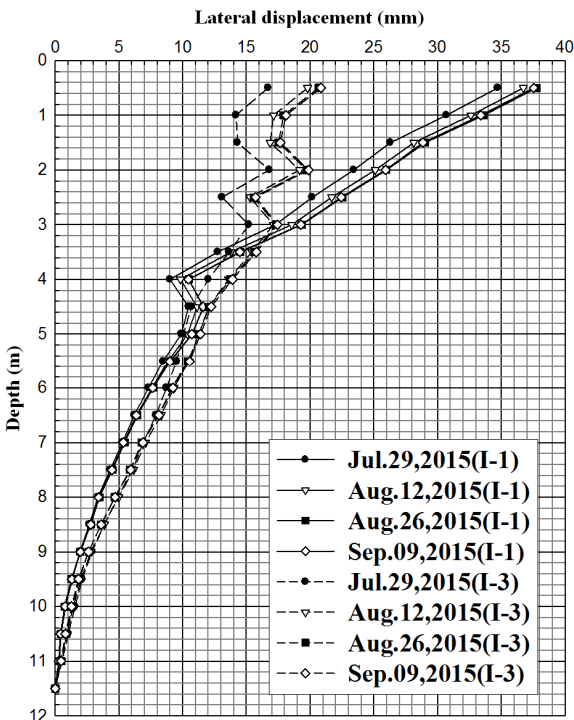


Fig. 4. Lateral displacement of the front wall monitored by inclinometer at the excavation depth of 6.0 m according to the measuring date in I-1 and I-3

3. IER공법의 수평변위억제효과

점토지반에서의 IER공법의 수평변위억제효과를 분석하기 위해서, 수치해석을 이용하였다. 해석은 현장 계측데이터를 사용하여 지반해석프로그램인 PLAXIS 8.6으로 역해석을 실시하고, 그 다음에 역해석으로 구해진 지반정수를 이용하여 IER공법과 단위길이 당 설치된 H-pile의 수가 동일하거나 더 많이 설치된 일열 H-pile 흠막이의 거동을 비교분석하였다.

현장 계측데이터는 지주의 두부의 결합 불량, 뒤채움 불량, 배면 하수 유입 등 다른 영향이 포함되지 않았다고 판단되는 I-3의 수평변위 계측 값 중에서 2015년 9월 9일(굴착 깊이: 6m)의 값을 적용하였다.

3.1 역해석을 통한 해석 지반 정수 산정

3.1.1 해석단면 및 초기 지반 정수

Fig. 5는 해석단면을 나타낸다. 해석단면을 이용하여 모델링을 하고, 전면지주 중에서 LW그라우팅은 차수를 위한 것이므로 검토에서는 제외하였다. 그리고 도로는 상재하중으로 교통하중인 13kN/m^2 을 적용하였다.

역해석의 초기 지반 정수는 지반조사보고서에 수록된 실험결과와 N치를 이용하여 계산된 값을 참고하여 선정하였으며, 그 중에서 점토층은 실험값을 적용하였으며, 변형계수는 Bowles(1996)의 문헌에 있는 연약한 점토의 범위에서 결정하였다. 그리고 지반은 Mohr-Coulomb 모델(Plaxis, 2002)을 적용하였고, 산정된 초기 지반정수는 Table 3과 같다. 또, IER 공법의 전면지주와 배면지주는 선형탄성모델(Plaxis, 2002)을 적용하였으며, 설계

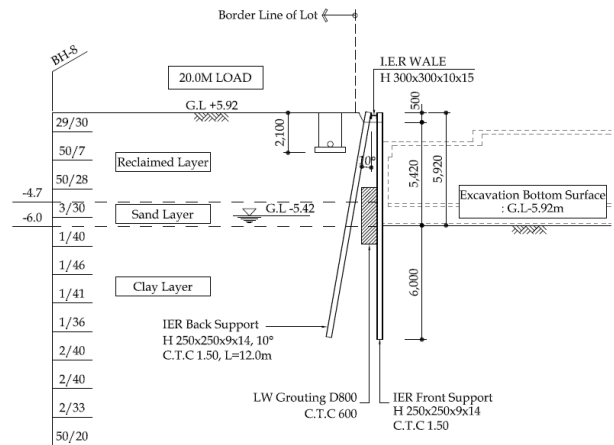


Fig. 5. Sectional view of field test site

정수는 Table 4와 같다. 그리고 지반과 H-pile사이의 상호작용을 적용가능하게 하는 인터페이스(Interface)요소는 적용하지 않았다. 그 이유는 실제 현장 계측데이터를 수집한 양산현장의 가시설 흙막이 벽체에는 내진설계를 적용하지 않기 때문에 지반 구조물 상호작용의 영향은 실무적으로 무시될 수 있기 때문이다.

3.1.2 역해석 방법

2015년 9월 9일 계측 완료 시의 I-3의 계측값 중에서 깊이 0.5m의 수평변위 20.86mm와 깊이 7.0m의 6.37mm를 참고하여 역해석을 진행하였다. 해석순서는 모델링한 단면에 지반 정수를 초기값으로 입력하고, 초기응력 상태를 설정하였다. 그 다음에 구조물을 설치하여 굴착을 진행한 상태에서 해석을 진행하여, 전면지주의 수평변위를 확인하였다. 해석에 나온 수평변위와 계측된 수평변위 값을 비교하여, 다름 시에 각 층의 변형계수를 수정하였다. 그래서 변형계수의 수정방법은 점토층의 변형계수를 먼저 변경시켜 하부지반의 변위를 맞추고, 그 다음에 매립층의 변형계수를 변경하여 해석을 진행하였으며, 모래층의 경우에는 층의 두께가 1.3m로 다른 층에 비해 상대적으로 지반변형에 영향이 거의 주지 않으므로 역해석에서 고려하지 않았다.

3.1.3 해석 지반 정수 산정

Fig. 6은 역해석 결과 중에서 수평변위를 정리한 것으로 깊이 0.5mm에서 20.96mm, 깊이 7.0m에서 5.94~7.32mm

정도로 해석된 상태로 현장계측데이터와 거의 차이가 나지 않아 역해석을 멈추었다. 그 때의 지반정수 값을 재설정된 지반정수로 결정하였고, Table 5는 역해석에 의해서 결정된 지반정수를 나타낸다. 그리고 Table 5에서 점토층의 변형계수는 초기에 Bowels(1996)의 연약점토층의 범위인 2,000~25,000kN/m²의 값을 적용하였으나, IER의 효과를 적용하기 위해서 중간정도의 점토층의 범위인 15,000~50,000kN/m²의 범위에서 변형계수의 값을 증가시키면서 해석을 진행하여 최종적으로 50,000kN/m²으로 결정되었고, 매립층의 경우에는 구조물기초설계기준

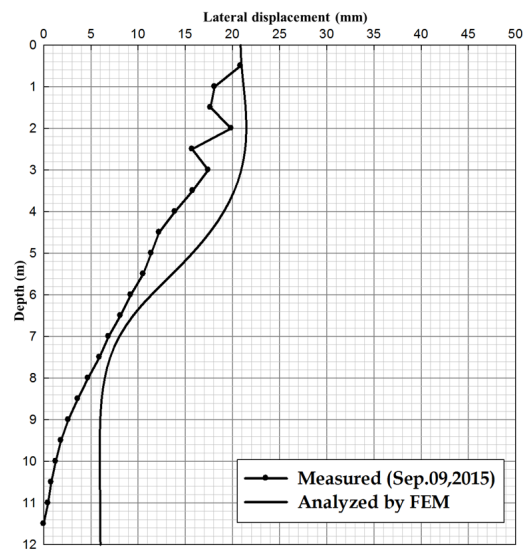


Fig. 6. Comparison of lateral displacements between measured data and FEM data

Table 3. Soil properties for FE analysis in field test site (Mohr-Coulomb model)

Soil type	γ_t (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	ϕ (°)	c (kN/m ²)
Reclaimed layer	18.0	40,000	0.33	27.0	5.0
Sand layer	18.0	30,000	0.33	20.0	0.0
Clay layer	17.4	20,000	0.33	6.0	31.2

Table 4. Material properties of supports for FE analysis in field test site (Linear elastic model)

Type of structure	Dimension of H-pile (mm)	Normal stiffness, EA (kN/m)	Flexural rigidity, EI (kN·m ² /m)	Interval (m)
Front support	H-250×250×9×14	1,290,520	15,120	1.5
Back support	H-250×250×9×14	1,290,520	15,120	1.5

Table 5. Soil properties determined by back analysis (Mohr-Coulomb model)

Soil type	γ_t (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	ϕ (°)	c (kN/m ²)
Reclaimed layer	18.0	35,000	0.33	27.0	5.0
Sand layer	18.0	30,000	0.33	20.0	0.0
Clay layer	17.4	50,000	0.33	6.0	31.2

해설(Korean Geotechnical Society, 2015)에서 조밀한 모래의 35,000~55,000kN/m²의 범위에서 증감시키면서 해석하여 초기의 40,000kN/m²보다 감소한 35,000kN/m²에서 거의 비슷한 값이 나타나 그 값을 변형계수로 결정하였다.

3.2 유한요소해석을 통한 수평변위억제효과 분석

3.2.1 해석 조건

IER 공법의 수평변위억제효과를 분석하기 위해서 양산 ○○현장에 적용된 IER공법의 전면지주와 배면지주의 단위길이(1m) 당 H-pile의 수와 동일한 경우와 2배, 3배로 H-pile이 설치된 일열 H-pile 흠막이의 수평변위를 비교하였다. Fig. 7은 해석조건을 나타내는 것으로 IER공법의 설치간격은 1.5m 이지만 H-pile이 지그재그 설치된 것(IER)으로 동일한 수의 H-pile을 설치하기 위해서는 0.75m 설치간격으로 설치해야 한다(SH_0.75). 그리고 설치된 개수가 2배인 경우는 설치간격이 0.375m

(SH_0.375)로, 3배인 경우는 설치간격이 0.25m(SH_0.25)인 일열 H-pile 흠막이를 적용하였다. Table 6은 해석조건에서 H-pile의 설치간격과 단위길이(1m) 당 H-pile 설치 개수를 정리한 것이고, 나머지 굴착 심도(m)나 지주의 설치각도(°) 등은 Table 2와 같다.

3.2.2 해석 정수

해석에 적용된 지반 정수는 역해석으로 다시 산정된 결과 값인 Table 5를 이용하였다. 구조물의 해석 정수는 2차원 해석에서 판(Plate)요소를 이용하여 Linear elastic 모델을 적용한다. 그래서 적용되는 대표적인 정수는 축강성(EA: Axial stiffness)과 휨강성(EI: Bending stiffness)이 있고, 동일한 강재를 적용하는 경우에 같은 값이 되어 진다. 그래서 설치간격의 차이를 표현하기 위해서 식 (1), (2)와 같이 설치간격을 나누어 주어 그 결과 값을 사용하여야 한다. 그 결과 Table 7과 같고, 적용된 구조물의 해석 정수의 값은 IER공법의 강성에 비해서 일열

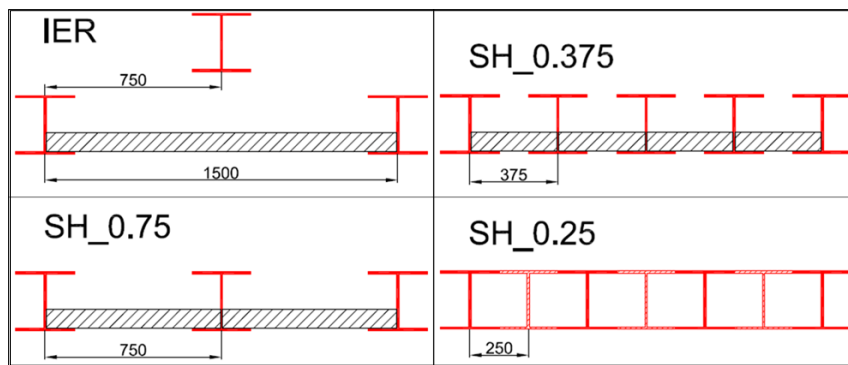


Fig. 7. Interval of analysis conditions

Table 6. Types and conditions of FE analysis

Case	Type	Interval (m)		The number of H-Piles per 1.0 m length
		Front support	Back support	
IER	IER method	1.5	1.5	1/0.75 (= 1.33)
SH_0.75	Single line H-piles	0.75	-	1/0.75 (= 1.33)
SH_0.375		0.375	-	1/0.375 (= 2.67)
SH_0.25		0.25	-	1/0.25 (= 4.00)

Table 7. Material properties for FE analysis (Linear elastic model)

Case		Dimension of H-pile (mm)	Normal stiffness, EA (kN/m)	Flexural rigidity, EI (kN·m ² /m)	Interval (m)
IER	Front support	H-250×250×9×14	1,290,520	15,120	1.500
	Back support		1,290,520	15,120	1.500
SH_0.75			2,581,040	30,240	0.750
SH_0.375			5,162,080	60,480	0.375
SH_0.25			7,743,120	90,720	0.250

H-pile 흠막이의 강성이 2배, 4배, 6배 증가됨을 알 수 있다.

$$EA = E_s \times A / \text{Interval} \quad (1)$$

$$EI = E_s \times I_x / \text{Interval} \quad (2)$$

여기서, E_s : 강재의 탄성계수(kPa)
 A : 강재의 단면적(m^2)
 I_x : 강재의 단면2차모멘트(m^4)
Interval : 강재의 설치 간격(m)

3.2.3 수평변위억제효과 분석 결과

Fig. 8은 수치해석의 결과 중에서 전면지주 혹은 전면 벽체의 수평변위를 깊이별로 나타낸 그래프이다. IER 공법의 경우, 최상단의 수평변위는 20.86mm 이고, 최대 수평변위는 깊이 2m에서 21.47mm 발생하였다. 그래서

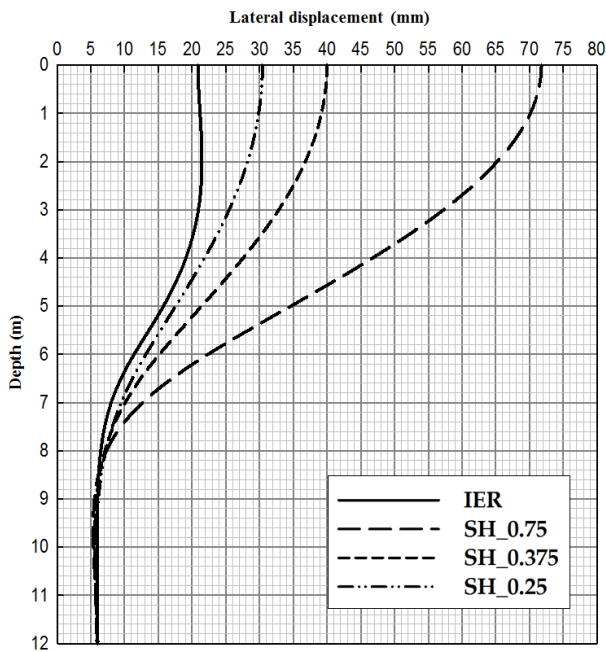


Fig. 8. Lateral displacement of front support

최상단과 깊이 2m 지점에서의 수평변위를 조건 별로 정리한 것이 Table 8과 같다. 그리고 Table 8에는 IER공법을 기준으로 하여 수평변위비와 IER공법의 수평변위 감소율(%)도 정리하였다. 그 결과, 단위길이(1m) 당 동일한 개수의 H-pile이 적용된 일열 H-pile 흠막이(SH_0.75)에 비해서 IER공법이 최상단에서 70.9%의 수평변위감소율을 보여주고 있고, IER 공법보다 구조물의 강성의 정도가 4배(SH_0.375), 6배(SH_0.25)인 일열 H-pile 흠막이에 비해서도 47.8%, 31.5%의 수평변위감소율을 보여주고 있다. 그러므로 IER공법처럼 배면지주를 경사지게 설치할 경우에 점토지반에서 상당히 큰 수평변위 억제효과를 발휘하는 것을 확인하였다.

4. IER 공법의 효과적인 점토지반 적용 방법 제안

Jeong et al.(2013)의 점토지반모형실험의 결과에서 지주의 근입부를 고정시킬 시에 변위가 억제됨을 확인하였다. 본 연구에서는 그들의 연구결과를 바탕으로 전면

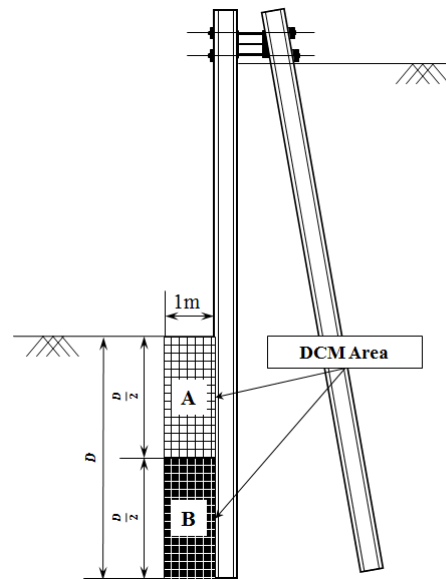


Fig. 9. DCM area

Table 8. Lateral displacement reduction rate (%)

Case	Lateral displacement		Lateral displacement ratio*		Lateral displacement reduction rate** (%)	
	Top	Depth=2m	Top	Depth=2m	Top	Depth=2m
IER	20.86	21.47	1.000	1.000	0.0	0.0
SH_0.75	71.77	65.99	0.291	0.325	70.9	67.5
SH_0.375	39.99	37.16	0.522	0.578	47.8	42.2
SH_0.25	30.44	28.49	0.685	0.754	31.5	24.6

* Lateral displacement ratio = (Lateral displacement)/(Lateral displacement of IER)

** Lateral displacement reduction rate = (1 - Lateral displacement ratio) × 100

지주를 고정되게 하는 방법을 고안하여, 전면지주의 근입부 앞쪽(굴착 쪽)에 DCM(Deep Cement Mixing method)을 1축($\phi = 1m$)으로 연속적으로 보강하는 방법을 제안한다(Fig. 9 참조).

4.1 변위억제방법 분석의 개요

제안된 DCM 보강을 보다 효율적이고 경제적인 보강 범위를 분석하기 위해서, 수치해석을 이용하여 분석하고자 한다. 그리고 수치해석의 단면은 현장의 해석단면인 Fig. 5를 이용하였다.

4.1.1 해석 조건

해석조건은 적용된 보강범위에 달리하여, DCM 보강이 없는 경우와 Fig. 9의 A와 B부분 모두 적용한 것, A, B를 각각 보강한 것으로 구분하여 총 4가지를 비교하였고 Table 9와 같다. 또, Fig. 9에서 'D'는 전면지주가 근입되어 있는 깊이를 나타내고, A의 범위는 굴착저면에서 근입깊이(D)의 중간까지를 보강하는 것이고, B는 근입깊이 중간부터 근입저면까지를 보강범위로 한다. 그러므로 해석에서는 현장의 근입깊이(D)가 6m이므로 근입깊이 0~3m가 A의 보강범위이고, 3~6m가 B의 보강범위이고, DCM의 두께는 제안한대로 1축의 지름인 1m를 적용하였다.

4.1.2 해석정수

해석에 사용된 지반정수는 Table 5의 값을 이용하고, H-pile의 설계정수는 Table 4의 값을 적용하였다.

그리고 DCM의 해석정수는 Chun et al.(2000)의 연구를 참고하여 결정하였고, 결정된 정수는 변형계수는 제안된 식을 이용하여 $500,000kN/m^2$ 으로 산정하였고, 내

Table 9. Description for analysis cases of IER using DCM

Case	Installation angle (°)		DCM area
	Front support	Back support	
IER			-
IER+DCM (A+B)	0	10	A,B
IER+DCM (A)			A
IER+DCM (B)			B

Table 10. DCM properties (Mohr-Coulomb model)

Type	γ_t (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	ϕ (°)	c (kN/m ²)
DCM	19.0	500,000	0.33	5.0	250.0

부마찰각은 문헌에 제시되고 일반적으로 사용되고 있는 5°를 적용하였고, 마지막으로 점착력의 경우에는 DCM의 설계 기준 강도의 1/8인 $250kN/m^2$ 을 적용하였다. 그렇게 결정된 DCM 해석정수는 Table 10과 같다.

4.2 해석결과 및 최적보강범위 제안

Fig. 10는 해석결과 중에서 전면지주의 최상단부터 깊이에 따라 최종수평변위를 정리한 것이고, Table 11은 최상단과 깊이 2m의 수평변위와 수평변위비 등을 나타낸 것이다. Fig. 10에서 DCM 보강을 하지 않은 경우 (IER)와 B에 보강된 경우(IER+DCM(B))는 거의 비슷한 거동을 보이고 있고, A만 보강한 경우(IER+DCM(A))와 A와 B 모두 보강된 경우(IER+DCM(A+B))가 거의 동일한 거동을 하는 것으로 해석되었다. 또 Table 11에서 최상단의 수평변위는 IER+DCM(A)가 IER에 비해서 수평변위가 52.45%감소하고, IER+DCM(A+B)는 IER보다 수평변위가 52.25% 감소하는 것을 알 수 있다.

수치해석의 결과로부터 근입부 전부 보강한 것이나 A만 보강한 것이나 차이가 없으므로, 경제성을 고려해

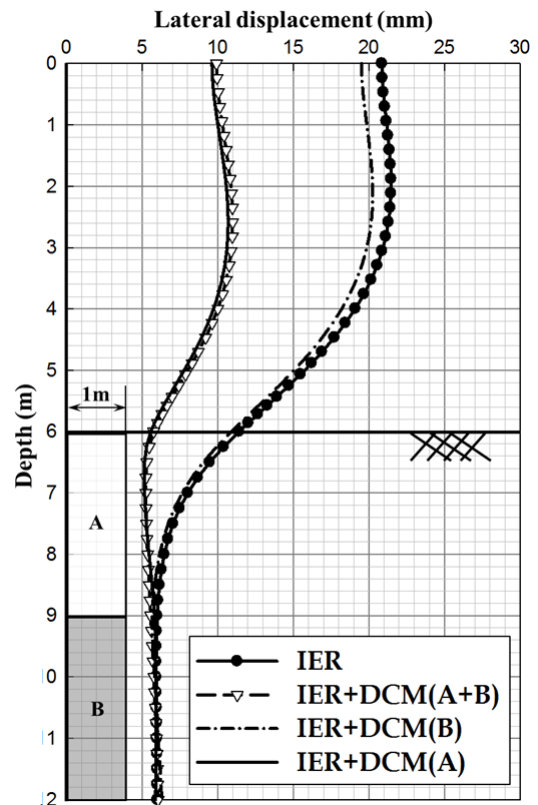


Fig. 10. Lateral displacement of front support according to DCM area

Table 11. Lateral displacement reduction rate according to DCM area

Case	Lateral displacement		Lateral displacement ratio*		Lateral displacement reduction rate** (%)	
	Top	Depth=2m	Top	Depth=2m	Top	Depth=2m
IER	20.86	21.47	1.000	1.000	0.00	0.00
IER+DCM (A+B)	9.92	10.82	0.476	0.504	52.45	49.06
IER+DCM (A)	9.96	10.52	0.477	0.490	52.25	51.00
IER+DCM (B)	19.50	20.23	0.935	0.942	6.52	5.78

* Lateral displacement ratio = (Lateral displacement)/(Lateral displacement of IER)

** Lateral displacement reduction rate = (1- Lateral displacement ratio)×100

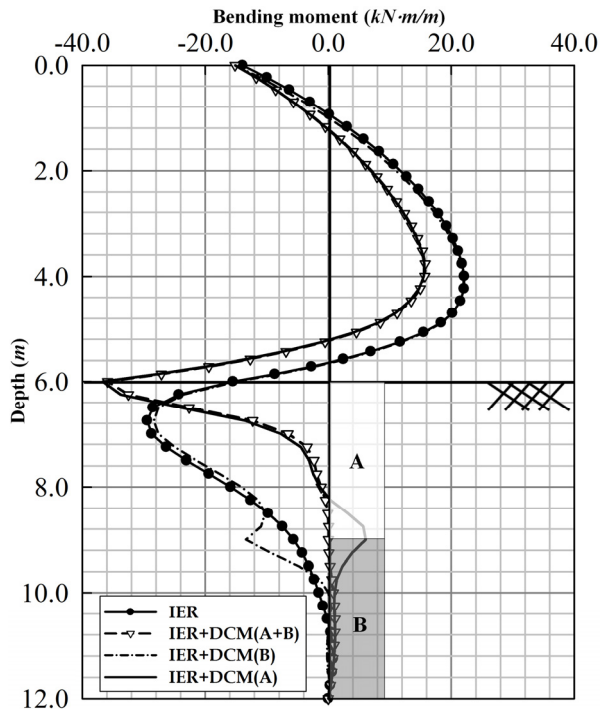


Fig. 11. Bending moment of front support according to DCM area

서 A만 보강하여도 상당한 변위억제가 가능할 것으로 판단된다. 또 Fig. 11은 수치해석 상의 휨모멘트를 정리한 그래프로, 지반에 보강을 하지 않은 IER의 최대휨모멘트가 굴착저면과 근입깊이(D)의 1/2지점 사이에서 발생하는 것을 알 수 있고, 이를 모멘트 변형을 억제하여 변위발생을 감소시키기 위해서 A부분에 보강해야 한다. 그러므로 DCM의 최적보강범위는 두께 1m(1축)으로 보강깊이는 굴착저면에서 근입부의 중간지점까지의 범위가 가장 적절하다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 연약점토지반에 적용된 IER의 계측 결과를 이용하여 연약점토지반에서의 구조적인 안정성

과 적용 방법을 분석하고 IER의 수평변위억제효과와 변위억제방법을 수치해석을 통해 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 현장실험을 통해서, 연약점토지반을 천공하여 배면지주를 설치할 경우에는 천공된 홀에 H-pile을 삽입하고 모래로 뒤채움과 물다짐을 실시하여 안정화시킨 다음에 굴착하여야 지반의 변위가 보다 확실하게 억제 가능할 것으로 판단되었다.
- (2) 현장실험의 지반조건과 계측결과를 이용하여, 두부가 고정된 IER과 일열 H-pile 흠막이의 단위깊이 당 H-pile 설치 개수를 달리하여 수치해석을 실시한 결과, IER이 최상단에서 최대 70.9%, 최소 31.5% 감소하는 것으로 분석되어 동일한 재료를 사용하여도 IER의 수평변위억제효과가 상당히 큰 것이 증명되어, 배면지주를 경사지게 설치한 IER 공법을 연약점토지반에 적용하며, 변위억제효과로 인한 지반의 안정성은 크게 향상될 것을 판단된다.
- (3) 점토지반에서 IER 공법의 효과적인 변위억제방법으로 DCM 보강을 제안하고, DCM 보강의 최적보강범위를 수치해석을 실시하여 분석한 결과를 통해서 굴착저면에서 근입깊이의 중간지점까지 보강한 경우와 근입부분 전체 보강한 경우의 변위억제효과의 차이가 없는 것으로 분석되었다. 그래서 최종적으로 DCM보강은 두께는 1m(1축)로 보강깊이는 굴착저면에서 근입깊이의 중간지점까지 할 것을 제안한다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

1. Bowles (1996), *Foundation Analysis and Design 5th Edition*, McGraw Hill.
2. Chun, B. S., Lim, H. S., and Jeon, J.G. (2000), "A Study on the Design-parameter of Mixed Ground by Using Cement-type Stabilizer", *Journal of the Koeran Geotechnical Society*, Koeran Geotechnical Society, Vol.16, No.2, pp.79-89 (in Korean).
3. 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 Koeran Geotechnical Society*, Koeran Geotechnical Society, Vol.29, No.6, pp.63-75 (in Korean).
4. Korean Geotechnical Society (2015), *Manual Guide for Design Criteria of Structural Foundation*, pp.43-279 (in Korean).
5. Plaxis (2002), *Plaxis Ver. 8 Material Model Manual*, pp.9-33.
6. 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*, Korean Geotechnical Society, Vol.28, No.12, pp.99-110 (in Korean).
7. Seo, M. S., Im, J. C., Kim, C. Y., and Yoo, J. W. (2016), "A Study on the Applicability of Retaining Wall Using Batter Piles in Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, The Canadian Geotechnical Society, Vol.53, No.8, pp.1195-1212.
8. 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 KOSHAM, Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.3, pp.225-264 (in Korean).

Received : July 11th, 2017

Revised : September 7th, 2017

Accepted : October 11th, 2017