

계면활성제계 그라우트를 활용한 흙막이 벽체공법(CIP)의 현장 적용성 평가

도진웅* · 김학승** · 박봉근*** · 이주형****

Do, Jinung*, Kim, Hakseung**, Park, Bonggeun***, Lee, Juhyung****

Evaluation on Field Applicability of Cast-In-Place Pile using Surfactant Grout

ABSTRACT

In case of underground construction affected by groundwater, CIP (Cast-In-Place Pile) method is generally used to resolve the geo-hydraulic problem. However, as this method has poor connectivity between piles, an auxiliary method for cut-off is needed in many cases. In this study, a new concept earth retaining wall method (H-CIP) with no auxiliary method, by using surfactant grout (Hi-FA) which improves antiwashout and infiltration ability, is introduced, and its field applicability is evaluated. CIP and H-CIP piles were installed with same ground conditions, and field and laboratory tests were conducted to verify the performance. As results, newly contrived H-CIP method shows higher field performance for cut-off and strength than conventional CIP method.

Key words : Cut-off wall, Surfactant grout, CIP, Antiwashout admixture

초록

지하수위의 영향을 받는 지반에 대하여 터파기를 실시할 경우 차수문제를 해결하기 위한 방법으로 현장타설말뚝 공법인 CIP (Cast-In-Place Pile) 공법이 보편적으로 사용되고 있다. 그러나 CIP 공법은 말뚝간 연결성이 좋지 않아 많은 경우 차수에 대한 별도의 처리를 필요로 한다. 본 연구에서는 수증불분리성과 침투성을 향상시켜주는 계면활성제(Hi-FA)를 활용한 그라우트를 사용하여 기존 CIP 공법 대비 보조차수 공법의 필요성을 최소화한 새로운 개념의 흙막이 공법(H-CIP)을 제시하고, 이 공법의 현장 적용성에 대하여 검토하였다. 현장 검증실험을 위하여 동일한 지반조건에 대하여 H-CIP 공법과 기존 CIP 공법으로 각각 차수벽을 시공하고, 성능검증을 위한 현장시험 및 실내시험을 수행하였다. 현장 실험결과 새로 제안된 H-CIP 공법은 기존 CIP 공법에 비하여 현장 차수능과 강도가 우수한 것으로 나타났다.

검색어 : 차수벽, 계면활성제, 흙막이벽체공법, 수증불분리제

* 노스캐롤라이나 주립대학교 토목공학과 박사과정 (North Carolina State University · jdo@ncsu.edu)

** 한국건설기술연구원 지반연구소 박사후연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · zeckimhs@kict.re.kr)

*** 중신회원·(주)백경지앤씨 대표이사 (BKGNC Co., Ltd. · busy7080@hanmail.net)

**** 중신회원·교신저자·한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · leejh73@kict.re.kr)

Received September 15, 2015/ revised December 26, 2015/ accepted January 8, 2016

1. 서론

도심지에서 새로운 구조물을 건설하는 경우 부족한 토지공간을 효율적으로 활용하기 위해 구조물의 일부분 혹은 전체가 지하공간에 설치된다. 이러한 지하공간을 마련하기 위한 초기단계는 터파기를 통한 작업공간의 확보이다. 이때, 흙막이용 벽체에 의한 주변 지반의 거동특성에 대한 명확한 이해가 필요하다(Lee, 2009). 지하수위가 존재하는 지역에 굴착공사를 실시할 경우, 터파기로 인한 지하수위 하강 때문에 주변구조물이 침하하여 안전상 문제가 발생하는 경우가 빈번하다(Ou et al., 1993; Hong et al., 2012). 따라서 안전한 굴착공사를 위해서는 토압에 대한 고려는 물론 지하수 차단을 위한 적절한 차수공법이 반드시 필요하다.

차수공법은 크게 주입공법, 압기(壓氣)공법, 차수벽공법 등으로 구분될 수 있으며, 현장 상황에 따라 다르게 적용된다. 굴착 이후 자립성이 좋지 못한 연약지반, 단층과쇄대와 같이 균열이 많은 지반, 또는 지하수에 의한 누수가 예상되는 구간 등에는 그라우팅 공법을 주로 시행하고 있다(Na et al., 2011). 도심지의 대형 지하구조물 건설시 터파기에 따른 차수문제를 해결하기 위한 전통적인 방법으로 주열식 흙막이 벽체 공법이 주로 사용되고 있다(Jang et al., 2012). 최근 도시화에 따른 도심지내 건설이 증가하여, 흙막이 벽체의 중요성 또한 증가하고 있다(NEMA, 2013).

흙막이 벽체 공법을 보다 세분화하면 1) 얽지말뚝(H-Pile) + 토류판, 2) Soil Cement Wall (SCW), 3) 강널말뚝(sheet pile), 그리고 4) Cast-In-Place Pile (CIP) 공법 등이 있다. 이 공법들은 현장여건과 경제성을 바탕으로 선택적으로 채택될 수 있다. 얽지말뚝과 토류판의 경우 불규칙한 굴착면에 대하여 적용성이 낮고, 공법의 특성상 뛰어난 차수효과를 기대하기는 어렵다. SCW 공법의 경우 강성이 부족하여 설계 혹은 차수에 대한 불확실성을 수반한다. 강널말뚝은 수밀성이 높으나 경질지반에서는 타입이 어렵고 강성이 떨어진다(Oh, 1999).

CIP 공법은 적용 가능한 지반이 다양하고, 충분한 강성, 저소음/저진동, 대심도 시공성 등의 장점을 가진다. 그러나 대심도에서의 수직도 불량, 비교적 고가의 시공비, 천공 하부의 슬라임 형성 등의 단점이 있다. 또한 말뚝간 연결성이 좋지 않아 지하수의 영향을 받는 경우 추가적인 차수공법이 필요하다(Oh, 1999).

차수를 주목적으로 할 경우, 보다 높은 차수능을 위해 보조차수공법을 실시하거나 공법개량, 재료개량 등의 처리가 필요하다. CIP 공법 시공시 가장 보편적인 보조차수공법은 말뚝과 말뚝 사이의 연결부 배면에 보조 그라우팅을 추가로 시공하는 것이다. 장비가 소형이므로 시공이 용이하며 경제적이거나, 차수능은 보통 수준이고 시멘트 약액의 이탈 우려가 높다(Kong et al., 2010). CIP 공법을 개량한 기존 공법으로는 흙형 강관파일을 삽입하여 연속적으로

후속 공을 천공하는 Excellent Joint Pile (EJ-Pile) 공법이 있다(Choi and Yoon, 2007). 또한, 주입재료를 개량한 공법으로는 아크릴레이트 약액(Acrylic Resin Chemical; ARC) 주입 공법과, 매우 낮은 투수능을 가지는 벤토나이트를 사용하는 Soil-Bentonite Mixture (SBM) 공법 등이 있다(Construction New Technology 402; Katsumi et al., 2008). 그러나 보조차수공법을 실시 할 경우 추가적인 비용이 발생하며, 공법개량의 경우에도 해당 공법에 맞는 장비와 보강재의 확보가 필요하다. 또한, 혼화제와 같은 약액을 통하여 차수능을 향상시키고자 하는 경우에도, 아직은 CIP 공법과 같은 보편적인 흙막이 공법에 대해 활발한 적용이 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 수중불분리성과 침투성을 향상시켜주는 계면활성제(Hi-FA) 그라우트를 사용하여 기존 CIP 공법의 시공과정을 준용하면서 보조차수 공법의 필요성을 최소화한 새로운 개념의 흙막이 공법(H-CIP)을 제시하고자 한다. H-CIP 공법의 현장 검증 실험을 위하여 동일한 지반조건에 대하여 H-CIP 공법과 기존 CIP 공법으로 각각 차수벽을 시공하고, 성능검증을 위한 현장시험 및 실내시험을 수행하였다.

2. 신개념 흙막이 공법(H-CIP)

2.1 Hi-FA 그라우트

세계 최초의 레미콘용 수중불분리제는 1974년 독일에서 셀룰로스계의 고분자(cellulose-based polymer) 형태로 개발되었고, 이 제품이 현재까지 사용되고 있다. 고분자계인 수중불분리제는 물에 대한 용해성이 떨어지기 때문에 교반 시간이 충분한 레미콘에 주로 적용된다. 그러나 교반 시간이 짧은 그라우트나 시멘트 몰탈의 경우 시멘트 양생 지연과 재료분리 유발의 취약점을 가지고 있다. 또한 이 제품은 점성은 뛰어나지만 유동성이 낮아 작업성에 대한 문제를 수반한다(Khayat, 1995). 계면활성제의 일종인 유동화제와 함께 사용하여 유동성을 높일 수는 있으나, 수중불분리성은 떨어지는 상반된 특성을 지니고 있다. 그러나 이를 대체할 효과적인 제품의 부재로 인해 어쩔 수 없이 사용되고 있는 실정이다.

이러한 시멘트 양생 지연, 재료 분리, 용해성 저하, 유동화제의 병용 사용 등의 문제점을 해결하기 위하여 1988년부터 일본에서 계면활성제를 활용한 연구가 활발히 진행되었다. 2002년에 2액형, 2004년에 세계 최초로 1액형 계면활성제계 제품이 개발되었다(Song, 2013). 이 계면활성제계 제품은 물과 계면활성제의 마이셀(micelle)이라는 나노 구조체로 구성되는 유사고분자(pseudo-polymer)가 점성과 유동성의 상반된 특성을 동시에 나타낸다. 국내에서는 2010년에 Non-Newtonian 특성을 가지는 1액형 계면활성제계 그라우트 혼화제(Hi-FA)가 최초로 개발되었다.

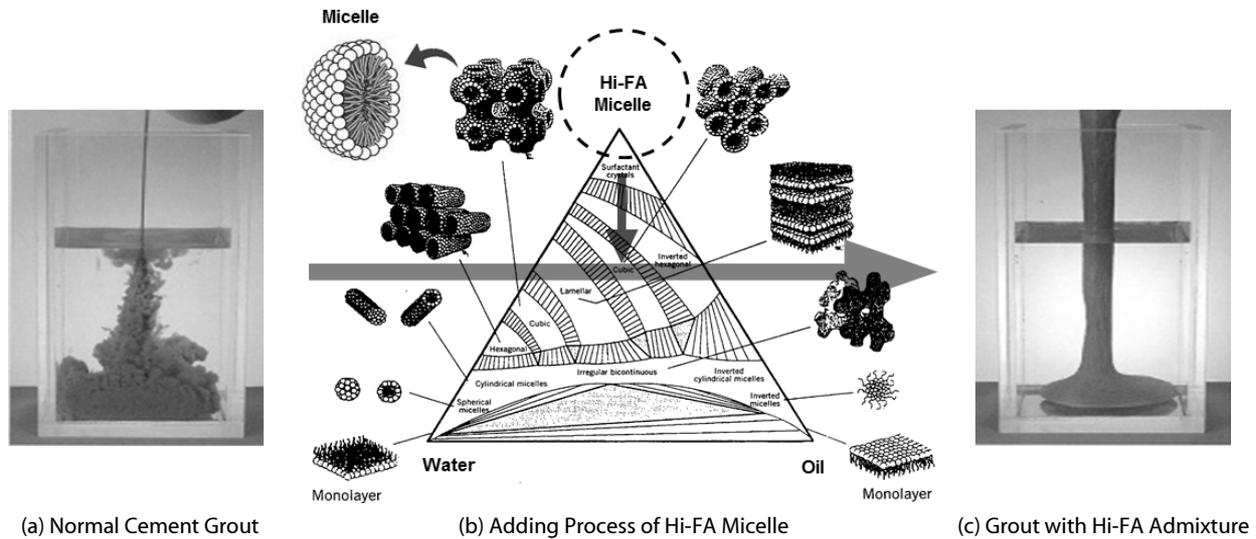


Fig. 1. Effect of Hi-FA Admixture (Somasundaran, 2006)

Table 1. Engineering Properties of Hi-FA Grout (W/C 50%, HI-FA 3%)

Property	Hi-FA mortar	KCI Standard mortar	Note
Gs (Hi-FA)	0.95 ~ 1.05	N/A	
Self-leveling (cm/min) *	21 ~ 23	N/A	JSCE-D104
pH	9 ~ 10	Less 12.0	
Suspension amount (mg/L)	Less 50	Less 150	KCI-AD102
Bleeding (%)	0.03	Less 0.1	
** (%)	7 days	89 ~ 115	KS L 5105
	28 days	93 ~ 115	

*spread rate of the grout in fresh water

** $\frac{UCScuring\ under\ water}{UCScuring\ at\ air}$ (UCS: Uniaxial Compressive Strength)

액상형 수중불분리제인 Hi-FA (High Performance & Multi-Functional Agent) 혼화제는 그라우트의 수중불분리성, 공법유지성, 침투성, 자기평탄성 등을 향상시켜준다. 이 Hi-FA 혼화제를 그라우트와 혼합한 것을 Hi-FA 그라우트라고 한다(Somasundaran, 2006; Fig. 1). 수중불분리성으로 인하여 수중에서 그라우트가 희석되지 않고 유해물질(ex. Cr^{6+} 1.5mg/L 이하)의 용출현상이 거의 없어 지하수에 대하여 친환경적이다. Table 1에 Hi-FA 그라우트에 대한 공학적 성질을 나타내었다(JSCE-D104, 1990; KCI-AD102, 2009; KS L 5105, 2007, Moon, 1997). Table 1에서 알 수 있듯이 Hi-FA 그라우트는 기준 공시체에 대한 공학적 성질을 만족할 뿐만 아니라 수중강도 측면에서 우수한 성능을 지니고 있다.

2.2 CIP 공법과 H-CIP 공법

로터리 보링기(rotary boring) 또는 오거(auger) 등을 이용하여 지반을 천공한 후 토압지지용 철골(H-Pile)을 일정한 간격으로 삽입하고, 나머지 공에는 철근망을 삽입한 뒤 콘크리트를 타설하여 현장타설 말뚝을 시공한다. 이를 연속적으로 시공하여 토류벽체를 형성하는 공법이 CIP 공법이다(Kim, 2008). 이때 CIP 공법 시공시 공과 공 사이의 연결부에 누수 발생가능성이 있거나 높은 차수능이 필요한 경우, 배면부에 보조차수그라우팅을 병행 시공하게 된다(Prezza and Basu, 2005; Table 2(a)). CIP 공법에 의한 말뚝의 직경이 400 mm일 경우 주로 직경 100 mm의 보조차수그라우팅을 실시한다(Oh, 1999). 그러나 이 보조차수그라우팅은 CIP 공법에 의한 현장타설말뚝의 단순 배면부에 타설되므로 효과적인 차수능을 기대하기 어렵다.

이에 반하여 H-CIP 공법은 계면활성제계 그라우트 혼화제인 Hi-FA를 혼합한 그라우트를 사용하여 기존 CIP 공법의 차수불량에 대한 근본적인 해결책을 제시할 수 있는 새로운 개념의 공법이다. H-CIP 공법은 수중불분리성과 침투성이 향상된 계면활성제 그라우트를 사용함으로써 말뚝과 말뚝 사이 연결부에 대한 그라우트 충전률을 높일 수 있어 기존 CIP 공법에서 사용하는 보조차수그라우팅 시공을 최소화 할 수 있다. 즉, 기존 CIP 공법에 의한 현장타설 말뚝과 Hi-FA 그라우트를 사용한 H-CIP 말뚝을 교차 시공함으로써 지하수위 및 지반조건에 상관없이 주열만으로 하중 지지와 차수문제를 해결할 수 있다(Table 2(b)). H-CIP 공법은 기존 CIP 공법의 단점을 보완할 수 있음에도 불구하고 현장시공 노하우가 부족하고 성능 검증이 제대로 이루어지지 않아 실제 현장에서 제대로 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서 H-CIP 공법의 현장 적용성을 확인해보고자 한다.

Table 2. Comparison of Construction Process on CIP and H-CIP Method (Prezzi and Basu, 2005)

	(a) CIP method & Auxiliary cut-off grout			(b) H-CIP method		
Scheme						
Process	- Bore Casing - Insert bar - Pour aggregate	- Pour mortar - Pull out casing	- Finish construction - Implement auxiliary cut-off grout	- After CIP by bi-pile - Bore Casing - Insert bar - Insert two pipes - Pour aggregate	- Inject Hi-FA grout by 1st pipe - Pull out 1st pipe - Pull out casing	- Inject Hi-FA grout by 2nd pipe - Pull out 2nd pipe
Plane view						

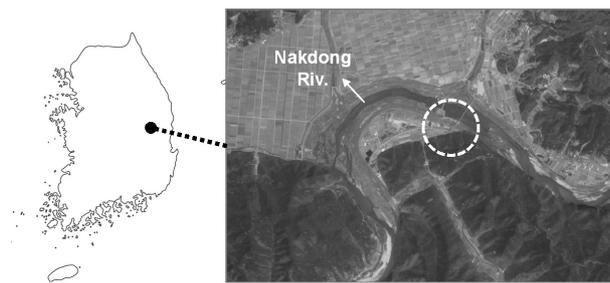


Fig. 2. Field Location (Dotted Circle)

3. 시험 시공

3.1 지반 조사

현장 시험시공은 하상퇴적층(모래자갈층)이 발달한 낙동강 인접 지역인 경북 안동시에서 수행되었다(Fig. 2). 시추조사, 표준관입시험(Standard Penetration Test; SPT), 현장투수시험 등을 통하여

사전 지반조사를 수행하였다. 현장투수시험은 변수위법으로 수행되었다(KS F 2322, 2010). EL. 0~1.0 m는 시추시 가이드 케이싱 (guide casing)이 설치됨에 따라 지반물성치 조사에 생략되었다. 지반조사 결과를 Table 3에 정리하였다.

해당지반은 EL. -1.0~2.5 m에서 SPT N치(타격횟수/관입깊이 (cm); 이하 동일) 11/30~25/30의 매립층(실트질모래에 소량의 자갈분포, 인위적 성토지반)이다. EL. -2.5~6.0 m는 N치 9/30~25/30의 모래층(중·조립의 모래질 분포, 하상퇴적층)이다. EL. -6.0 m 하부는 N치 17/30~25/30의 모래자갈층(중·조립의 모래 및 다량의 자갈 분포, 하상퇴적층)으로 확인되었다.

현장투수계수는 EL. -5.0 m까지 1.15E-3 cm/sec ~ 5.19E-4 cm/sec 로 모래와 실트 사이의 값을 보였다. 모래자갈층이 나타나기 시작하는 EL. -5.0 m 이후로는 투수능이 매우 높아 현장투수시험법으로 투수계수를 산정할 수 없었다. 지하수위는 EL. -3.1 m에 위치하는 것으로 조사되었다.

Table 3. Engineering Properties of Tested Ground

Depth (-m)	G_s	Passing #4 (%)	Passing #200 (%)	USCS	Atterberg limit	k (cm/sec)	SPT N (blow/30)	Typical layer	Water level (-m)
1~2	2.68	89.1	16.5	SM	N.P	1.17E-3	18~25	Landfill	3.1
2~2.5	-	-	-	-	-	5.49E-4	11~18		
2.5~3	-	-	-	-	-				
3~4	2.67	72.3	16.2	SM	N.P	1.15E-3	10~11	Sand	
4~5	-	-	-	-	-	5.19E-4	9~10		
5~6	-	-	-	-	-	Leakage	9~25		
6~7	2.67	49.1	8.9	GW-GM	N.P		17~25	Sand-Gravel	
7~8	-	-	-	-	-		17~25		

따라서 투수계수 및 N치로 판단하였을 때 전반적으로 매립층, 모래층, 모래자갈층으로 형성된 중간정도 조밀한 사질토 지반으로 판단할 수 있었다. 지반조사 결과에 따라 다양한 지층들에 대한 성능검증을 위하여 현장타설말뚝의 목표 깊이를 8.0 m(매립층-모래층-모래자갈층)로 결정하였다.

3.2 말뚝 배치 및 성능 검증 시험

기존 CIP 공법에 의한 주열식 흙막이의 차수능과 Hi-FA 그라우트에 의한 H-CIP 공법의 차수능의 차이를 비교분석하기 위하여 다음과 같이 시공계획을 수립하였다(Fig. 3). Case 1) 일반적인 CIP 말뚝은 직경 408 mm로 설계를 하지만 케이싱 직경(428 mm)으로 인해 일부 겹침 구간이 발생하게 된다. 따라서 말뚝과 말뚝 사이를 10 mm로 겹침시공 하는 경우를 Case 1로 정하였다. Case 2) 말뚝 시공시 사용하는 케이싱의 직경인 428 mm로 맞댐시공 하는 경우를 Case 2로 정하였다. Case 3) CIP 공법 시공시 현장타설말뚝의 수평 허용오차는 말뚝길이의 1/50 미만, 또는 50 mm 미만으로 둔다(KSCE, 2004). 따라서 허용오차를 양쪽으로 50 mm씩 가정하여 말뚝과 말뚝 사이를 100 mm 이격하여 시공하는 경우를 Case 3으로 정하였다. 차수벽 시공 후 굴착을 통하여 지하수의 차수능을 육안으로 확인하기 위하여 차수벽이 폐합되게 설계하였으며, Fig. 3과 같이 최종 배치계획을 수립하였다. Fig. 3에 시추 및 공내수압시험을 실시한 위치 BH ①~⑥을 함께 나타내었다.

총 50공 중 25공은 한 공씩 이격하여 1차 시공을 마친 뒤, 나머지 25공(H-CIP 공법에 의한 10공 포함)에 대하여 2차 시공을 진행하였다. 시공완료 이후 배면굴착을 실시하여 육안관찰을 통해 구근 형태와 확장성을 관찰하였으며, H-CIP 말뚝 1 본을 인발하여 구근의 확장폭을 측정하였다. 겹침시공 및 맞댐시공의 이음부, 말뚝의 중앙부에 대하여 시추를 실시하여 코어를 채취하고 강도시

험을 수행하였다. 그리고 해당 시추공에 현장수압시험을 실시하여 차수능을 평가하였다(Houlsby, 1976; Quinones-Roza, 2010).

4. 시공 결과

4.1 구근 확대 평가

CIP 공법과 H-CIP 공법에 의한 현장타설말뚝간 구근형성 차이를 실측하기 위하여 배면굴착을 실시하였다. 실측은 배면굴착을 통하여 드러난 표면상의 직경을 측정하였으며, 육안 관측은 지하수 위로 인하여 EL. -4.5 m까지 측정하였다.

기존의 CIP 공법으로 시공한 말뚝에서는 재료분리 현상이 쉽게 관찰되었다(Fig. 4). H-CIP 공법으로 시공한 말뚝과 동일한 위치의 CIP 공법으로 시공한 말뚝 10개소 중 3개소에서 재료분리 현상 또는 양생불량으로 지름의 30% 이상 소실이 발생하였다. 이 현상은 말뚝 상단에서 뚜렷하게 나타났는데, 재료분리로 인한 블리딩(bleeding) 효과에 의해 유발된 것으로 판단된다. 반면 H-CIP 공법으로 시공한 말뚝에서는 재료분리 현상이 발견되지 않았으며 Hi-FA 그라우트의 수중불분리성이 충분히 발현된 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)는 시공간격별 말뚝의 직경차이를 보여준다. 이격시공한 Case 3의 경우 CIP 말뚝과 H-CIP 말뚝 모두 뚜렷한 구근 확대 성능을 보여주지 못했다. 측정된 15 곳 중 CIP 말뚝의 경우 2 곳에서, H-CIP 말뚝의 경우 5 곳에서 설계직경보다 더 큰 직경이 측정되었으며, 구근이 확대된 양이 설계직경의 약 4.5%에 불과하여 그 효과를 확인하기 어려웠다. 맞댐시공한 Case 2의 경우 CIP 말뚝의 경우 2 곳에서, H-CIP 말뚝의 경우 7 곳에서 설계직경보다

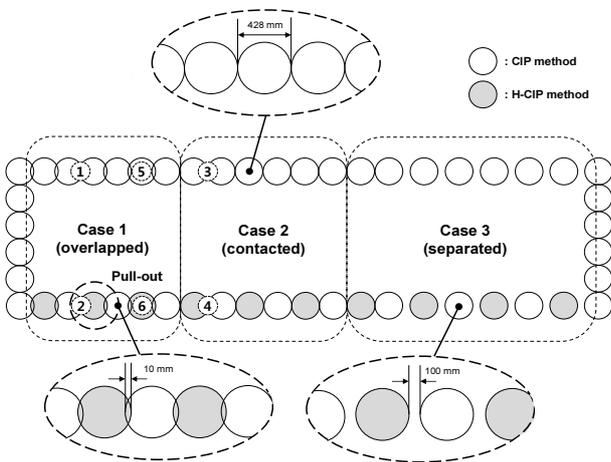


Fig. 3. Plane View of Design

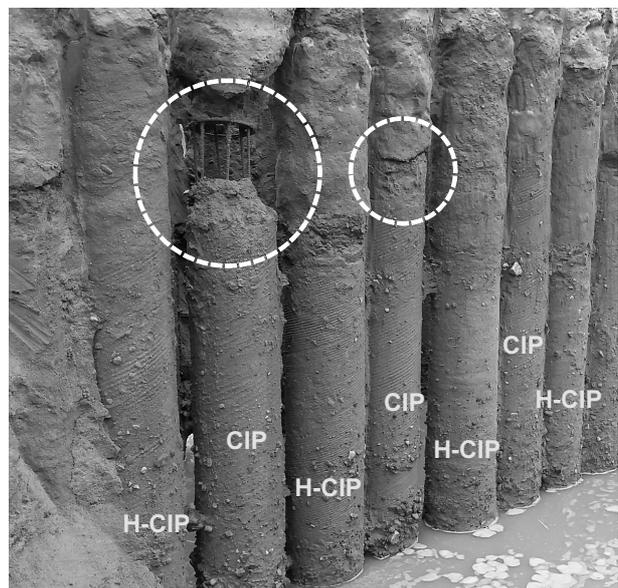


Fig. 4. Separated Materials on CIP Method

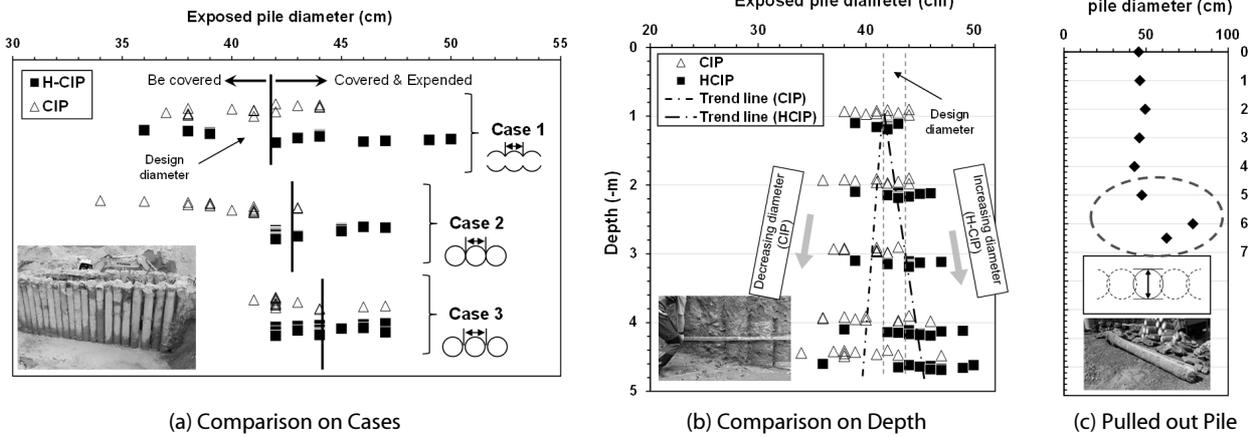


Fig. 5. Visual Examinations on Tested Piles

큰 직경이 측정되었다. 확대된 양은 설계직경의 약 8.5%로서 Case 3에 비하여 향상된 결과를 보였다. 겹침시공한 Case 1에서는 CIP 말뚝 5 곳, H-CIP 말뚝 10 곳에서 설계직경보다 큰 직경이 측정되었다. 확대된 정도는 설계직경의 최대 약 21%로서 일부 H-CIP 말뚝에서는 뚜렷한 구근 확대 성능을 보여주었다. 따라서 주변 말뚝이 인접할수록 Hi-FA 그라우트의 침투 현상이 보다 뚜렷하게 발견되어 구근 확대능까지 향상되는 것으로 판단된다.

대부분의 시공간격 실험 결과에서 H-CIP 말뚝의 직경이 CIP 말뚝의 직경보다 확대되었음을 확인하였다. 이 결과는 시공 심도와 깊은 관련이 있었다. Fig. 5(b)는 깊이에 따른 공법별 말뚝의 직경 측정치를 보여준다. H-CIP 말뚝은 하부로 내려갈수록 직경 확대에 의해 표면상 직경이 늘어나는 경향을 보인다. 그러나 CIP 말뚝은 하부로 내려갈수록 재료분리, 또는 H-CIP 말뚝의 직경 확대에 의해 표면상 직경이 줄어드는 즉, 얇아지는 경향을 보였다.

이러한 현상은 심도별 상대하중 차이에서 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 말뚝 상부에서는 낮은 구속압력으로 인해 주입시 계면활성제계 그라우트가 주변 지반으로 침투되지 못하고 상부로 유출되었다. 이로 인해 말뚝 상부에서는 구근 확대가

일어나지 않을 뿐만 아니라 블리딩 현상까지 더해져 품질저하를 일으키는 것으로 판단된다(Fig. 4). 반면, 말뚝 하부에서는 높은 구속압으로 인해 그라우트가 방사 방향으로 말뚝의 주변지반에 침투가 가능하다. Fig. 5(b)에서 확인하였듯이 심도가 깊어짐에 따라 구근 확대능이 증가하므로 H-CIP 공법은 깊은 심도에서 더욱 계면활성제계의 기능이 발휘 될 것을 예측할 수 있다.

깊이에 따라 구근의 확대가 일어나는 현상을 최종 심도까지 확인하기 위하여 H-CIP 말뚝 1본을 직접 인발하여 직경을 측정하였다(Fig. 3, Fig. 5(c)). 인접 말뚝에 의해 구속되는 방향의 직교방향으로 측정함으로써 보다 순수한 구근 확대능을 확인하고자 하였다(Fig. 5(c)). 그 결과, EL. 0~5 m의 직경은 43~49.5 cm로 설계 직경값에서 2.2~8.7 cm (5~21%) 가량 확대되었다. EL. -6~-7 m에선 78.5 cm, 62.5 cm로 21.7~37.7 cm (53~92%)의 높은 구근확대를 보였다. 이것은 Fig. 5(a)의 결과값과 비교하여 주변말뚝에 의해 구속된 수평방향에 비하여 구속되지 않은 직교방향의 구근 확대능은 매우 뛰어난 것을 의미한다. 또한 대상 지반이 모래자갈층인 것과 깊은 연관이 있는 것으로 보이며, 모래자갈층의 높은 간극수준이 Hi-FA 그라우트의 침투성 발현에 주요한 영향을 미친 것으로 판단된다.

따라서 본 연구의 계면활성제계 그라우트는 시공 심도와 대상 지층의 간극 수준에 의해 성능에 큰 영향을 받을 것으로 판단할 수 있다.

4.2 차수능 평가

CIP 공법과 H-CIP공법에 의한 현장타설말뚝간 차수능 확인을 위하여 계획한 BH ①~⑥에 대하여 현장수압시험(Lugeon Test)을 실시하였다(Fig. 3). 현장수압시험은 암반에 대한 투수시험으로, 압력에 따른 주입수량을 통하여 Lugeon치를 측정하여 투수특성을 파악하는 시험이다(Hously, 1976). 본 시험에서는 측정대상구간

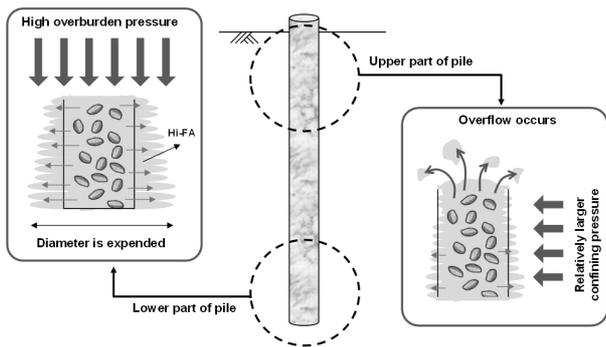


Fig. 6. Mechanism of Hi-FA Infiltration Varying Depth

Table 4. Results of Field Permeability (Lugeon) Tests

BH No.		①	②	⑤	⑥	③	④	In-Situ
Explanation		Case 1				Case 2		
Scheme		Overlapped joint (CIP-CIP)	Overlapped joint (CIP-HCIP)	Center of CIP pile	Center of HCIP pile	Contacted joint (CIP-CIP)	Contacted joint (CIP-HCIP)	-
k (cm/sec)	EL. -2 ~ -4 m	N/A	9.43E-4	1.23E-3	2.12E-6	N/A	7.84E-4	
	EL. -5 ~ -6 m	N/A	N/A	N/A	4.42E-6	N/A	N/A	Leakage

(● : H-CIP pile / ○ : CIP pile / ○ : boring point)

까지 굴착하여 해당구간에 패커(packer)를 설치하여 측정하는 싱글 패커 방법(single packer method)을 사용하였다. EL. -4 m까지 굴착한 뒤 -2 m 구간에 패커를 설치하여 EL. -2~-4 m 구간의 투수계수를 산출하였다. 이후 EL. -6 m까지 굴착한 뒤 -5m 구간에 패커를 설치하여 EL. -5~-6 m 구간의 투수계수를 산출하였다. EL. -2~-4 m 구간은 지하수위가 존재하는 구간이며, EL. -5~-6 m 구간은 모래층에서 모래자갈층으로 변하는 구간으로서 투수계수 측정의 의미를 가진다.

결과는 Table 4와 같다. 말뚝 이음부(BH ①~④)에서는 Case 1, 2 또는 말뚝의 종류와 상관없이 대부분 원지반의 투수능과 큰차이를 보이지 않거나 시험이 불가할 만큼 투수능이 높았다. 4.1절에서 밝힌 구근확장으로 인하여 향상된 차수효과를 기대하였지만 결과는 그러하지 않았다. 이는 구근이 충분한 차수를 일으킬 만큼 확장되지 않았거나, 시추 중 회전에 의한 균열 등으로 누수의 요인이 발생한 것으로 판단된다.

그러나 구근중앙부의 수압시험(BH ⑤, ⑥)은 EL. -2~-4 m에서 H-CIP 말뚝(BH ⑥)의 경우 CIP 말뚝(BH ⑤)에 비하여 약 1/500 수준의 투수계수를 나타내었다. 이것은 CIP 말뚝의 수중양생 보다 H-CIP 말뚝의 수중양생이 잘 이루어져 차수능이 향상되었음을 의미한다. 또한 EL. -5~-6 m에서는 CIP 말뚝의 경우 누수로 인해 현장수압시험을 진행할 수 없었지만, H-CIP 말뚝의 경우 EL. -2~-4m와 비슷한 수준의 투수계수를 보였다. 이는 CIP 말뚝의 경우 말뚝 하부로 갈 수록 양생이 불량하지만, H-CIP 말뚝의 경우 전반적으로 일정한 품질로 양생되었다고 볼 수 있다. 따라서 Hi-FA 그라우트의 수중불분리성이 구근의 양생과 차수능에 주요한 영향을 미쳤다는 것을 의미한다.

4.3 강도 평가

CIP 공법과 H-CIP 공법으로 시공한 현장타설말뚝의 강도평가를

위해 BH ⑤~⑥에서 시추한 코어로 직경 50 mm, 높이 100 mm의 공시체를 제작하여 일축압축시험을 실시하였다. 이때 지층 및 지하수위의 영향을 파악하기 위하여 Fig. 7과 같이 공시체의 위치를 정하였다. C1, H1 공시체는 지하수위 위의 매립층을 의미한다. C2, H2는 지하수위 위의 모래층을 의미한다. C3, H3는 지하수위 아래의 모래자갈층을 의미한다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 지하수위 위의 매립층에서 H-CIP 공시체(H1)의 일축압축강도는 CIP 공시체(C1)의 일축압축강도에 비하여 약 122% (H1/C1)의 강도 증가율을 보였다. 지하수위 아래의 모래층에서는 약 464% (H2/C2)의 강도 증가율을 보였다. 지하수위 아래 모래자갈층에서의 CIP의 경우(C3) 코어링 상태 불량으로 채취가 불가능하였다. 반면 H-CIP 공시체(H3)는 코어링이 양호함은 물론 25.75 MPa의 강도를 보였다. 이 수치는 코어의 위치에 상관없이 한국콘크리트학회(KCI-AD102, 2009)에서 규정하는 수중제작 공시체의 압축강도 13 MPa를 모두 만족하는 수치이다. 반면 CIP 말뚝의 일축압축강도는 규정 압축강도를 모두 만족하지 못하였다. 또한 지하수위 하부에서 상당히 낮은 압축강도를 나타낸

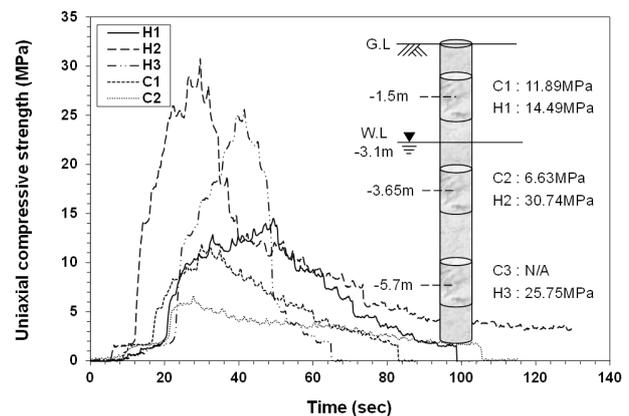


Fig. 7. Results of Uniaxial Compressive Tests

것으로 보아 지하수위 하부에서 재료분리로 인한 강도 저하가 심하게 일어났음을 알 수 있다. 이 결과는 4.2절 치수능 평가 부분에서 말뚝 하부의 투수계수가 낮은 것과 같은 맥락으로 판단된다.

한편 H2, H3의 일축압축강도에 비하여 H1의 일축압축강도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 재료분리로 인해 말뚝 상단부의 그라우트 불량을 야기했거나, 상부 구속압이 낮아 제대로 양생이 이루어지지 않았을 가능성이 있는 것으로 보인다. 지하수위의 영향을 받음에도 불구하고 H2와 H3의 일축압축강도 값이 상당히 양호한 것으로 미루어, 상대적으로 낮은 상부에서의 구속압이 양생에 불리한 조건으로 작용한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 터파기시 흙막이 벽체로 일반적으로 적용되는 CIP 공법의 문제를 해결하기 위하여 계면활성제(Hi-FA)를 이용한 신개념 흙막이 공법인 H-CIP 공법의 성능을 평가하고 현장적용성에 대하여 검토하였다. 이를 위해 매립층, 모래층, 모래지갈층으로 구성된 지역에 기존 CIP 공법과 H-CIP 공법으로 각각 치수벽을 형성하고, 현장 및 실내 실험을 수행하였다.

배면굴착을 통한 육안확인 결과, H-CIP 공법으로 시공한 말뚝의 상부에서 하부로 갈수록 CIP공법에 비하여 구근이 확대되는 경향을 보였으며, 말뚝이 인접할수록 계면활성제계 그라우트의 침투성이 보다 크게 발휘됨을 확인할 수 있었다. 재료분리 현상 역시 H-CIP 말뚝에 비해 CIP 말뚝에서 더 크게 나타났다. 그러나 H-CIP 말뚝의 이러한 특징들이 H-CIP 치수벽의 치수능 증가에 실질적인 도움이 되진 못하였다. 현장수압시험을 통하여 말뚝이음부의 치수능을 확인한 결과 시험공의 대부분에서 현장 지반과 비슷한 수준의 투수계수를 나타내었다. 그러나 말뚝 중앙부의 현장수압시험 결과, H-CIP 말뚝이 CIP 말뚝에 비해 크게 향상된 치수능을 보여주었다. H-CIP 말뚝 중앙부의 투수계수가 낮게 측정된 것은 계면활성제계 그라우트의 수중불분리성으로 인한 수중양생의 우수성으로 판단된다. 또한 해당 공법은 수중양생 콘크리트의 강도 기준치를 모두 만족할 뿐만 아니라 약 2배 이상의 우수한 강도를 보였다.

결과적으로 계면활성제계 그라우트를 사용한 H-CIP 공법은 수중양생에 따른 강도 측면의 우수성을 충분히 발휘하나, 아직 보조그라우팅을 완전히 배제시킬 만큼의 치수능을 발휘하지는 못하는 것으로 파악되었다. 이는 지층, 지하수위, 구속압 등 여러 요인들에 대한 개선점이 필요함을 의미한다. 또한 다양한 지반조건에 대한 충분한 실험의 검증실험이 이루어지지 못하였다. 따라서 H-CIP 공법을 실제 현장에 적용하기 위해서는 해당 공법에 대한 노하우 확보 및 적용 대상 지반의 세밀화 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “인명구조용 수평 굴착 및 안정화 기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

References

- Choi, J. and Yoon, E. (2007). “Excellent-joint pile to improve waterproofing and continuous boring in cast in place pile method.” *Proceeding of 33rd Korea Society of Civil Engineering Conference*, Seoul, pp. 850-853.
- Construction New Technology 402. *Structural and rock cut-off method using Acrylic Resin Chemical* (in Korean).
- Hong, W., Kang, C. and Yoon, J. (2012). “The behavior of earth retaining walls applied to top-down construction method using back analysis.” *Journal of Engineering Geology*, Vol. 22, No. 1, pp. 39-48.
- Houlsby, A. C. (1976). “Routine interpretation of the Lugeon water-test.” *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 9, pp. 303-313.
- Jang, S., Choi, J., Song, B., Choi, Y. and Yoon, J. (2012). “Advanced C.I.P method to use the steel-casing with inner joint.” *Journal of Korean Geo-environmental Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 95-102.
- JSCE-D104 (1990). *Anti-washout properties under water: degree of separation in water as measured by the mass of suspended substances* (in Japan).
- Katsumi, T., Kamon, M., Inui, T. and Araki, S. (2008). “Hydraulic barrier performance of SBM cut-off wall constructed by the trench cutting and re-mixing deep wall method.” *Proceeding of GeoCongress 2008*, ASCE, pp. 628-635.
- KCI-AD102 (2009). *Quality specification of antiwashout admixture for concrete* (in Korean).
- Khayat, K. H. (1995). “Effects of antiwashout admixtures on fresh concrete properties.” *ACI Material Journal*, Vol. 92, No. 2, pp. 164-171.
- Kim, I. H. (2008). “Technology development of forming continuous pile wall as new concept.” *Construction Journal*, Vol. 87, pp. 60-61.
- Kong, J., Kim, C., Park, J. and Chun, B. (2010). “Grouting effects of microfine cement in the rock-based sites.” *Journal of Korean Geo-environmental Society*, Vol. 11, No. 12, pp. 37-45.
- Korea Society of Civil Engineering (KSCE) (2004). *Civil engineering works specification*.
- KS F 2322 (2010). *Standard test methods for permeability of saturated soils* (in Korean).
- KS L 5105 (2007). *Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortars* (in Korean).
- Lee, J. (2009). *Ground behavior due to adjacent excavation*, Master Dissertation, University of Seoul (in Korean).
- Moon, H. (1997). “Quality specification of antiwashout admixture for concrete.” *Magazine of Korea Society of Civil Engineering*,

- Vol. 45, No. 1, pp. 71-77.
- Na, D., Kim, J., Kim, K. and Jeon, M. (2011). "Application example of eco-friendly grouting in cofferdam on coast soft ground." *Magazine of Korean Geo-environmental Society*, Vol. 12, No. 3, pp. 23-29.
- National Emergency Management Agency (NEMA) (2013). *Disaster Yearbook (2012)* (in Korean).
- Oh, J. (1999). *Design and Construction of Retaining Wall*, Engineers (in Korean).
- Ou, C. Y., Hsieh, P. G. and Chiou, D. C. (1993). "Characteristics of ground surface settlement during excavation." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 5, pp. 758-767.
- Prezzi, M. and Basu, P. (2005) "Overview of construction and design of auger cast-in-place and drilled displacement piles." *Proceeding of the 30th Annual Conference on Deep Foundations*, Chicago.
- Quinones-Roza, C. (2010). "Lugeon test interpretation, revisited. In collaborative management of integrated watersheds." *Proceeding of 30th US Society of Dams Annual Conference*, pp. 405-414.
- Somasundaran, P. (2006), *Encyclopedia of Surface and Colloid Science 2nd edition, Volume 4*, Taylor & Francis, USA.
- Song, B. (2013). *A study on the engineering characteristics and the field applicability analysis of a Hi-FA grout which is a kind of surfactants*, Ph.D. Dissertation, Kyeongsung University (in Korean).