

고칼슘 연소재를 이용한 매입말뚝 주면고정액의 현장 재하시험을 통한 성능평가

Performance Evaluation of Pile-Filling Material Using High Calcium Ash by Field Loading Test

서 세 관¹ Seo, Se-Kwan 김 유 성² Kim, You-Seong
임 양 현³ Lim, Yang-Hyun 조 대 성⁴ Jo, Dae-Sung

Abstract

In this study, static load test and dynamic load test were performed to evaluate pile-filling material (ZA-Soil) of soil-cement injected precast pile method which was developed by using the ash of circulating fluidized boiler as a stimulant for alkali activation reaction of blast furnace slag. As a result of the static load test, the allowable bearing capacity of pile was 1,350 kN, which was the same as the result of using ordinary portland cement. And total settlement was 6.97 mm, and net settlement was 1.48 mm. These are similar to the total settlement, 7.825 mm, and net settlement, 2.005 mm of ordinary portland cement. As a result of the dynamic load test and CAPWAP analysis, the skin friction was 375.0 kN, the end bearing capacity was 3,045.9 kN, and the allowable bearing capacity was 1,368.36 kN. These results are similar to the results of using ordinary portland cement as pile-filling material.

요 지

순환 유동층 보일러의 연소재를 고로슬래그의 알칼리 활성화 반응 자극제로 활용하여 개발한 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)을 시멘트밀크 공법의 주면고정액으로 사용한 말뚝에 대하여 정재하시험 및 동재하시험을 실시하여 보통 포틀랜드시멘트(OPC)와 비교하여 성능을 평가하였다. 정재하시험을 수행한 결과 말뚝의 허용하중은 1,350kN로 보통 포틀랜드시멘트를 매입말뚝의 주면고정액으로 사용한 결과와 동일하였고, 전 침하량은 6.97mm, 순 침하량은 1.48mm로 보통 포틀랜드시멘트의 전 침하량 7.825mm, 순 침하량 2.005mm와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 동재하시험 및 CAPWAP분석을 실시한 결과, 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)의 주면 마찰력은 375.0kN, 선단 지지력은 3,045.9kN, 허용지지력은 1,368.36kN으로 나타났고, 포틀랜드시멘트를 매입말뚝의 주면고정액으로 사용한 결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

Keywords : High calcium ash, Pile-Filling material, Soil-cement injected precast pile method, Static load test, Dynamic load test

1 정희원, 지안산업 기업부설연구소장 (Member, Research director, Zian Company Ltd.)

2 정희원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ.)

3 비희원, 주식회사 대웅 기업부설연구소장 (Research director, Research Institute, Daewoong Company Ltd.)

4 정희원, 전북대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chunbuk National Univ., Tel: +82-63-270-2420 Fax: +82-63-270-2421, sculptart@jbnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

경제성장으로 인한 도심지와 연약지반 등 다양한 지반조건에서의 건설이 증대됨에 따라 구조물의 안정성을 쉽게 확보할 수 있고, 지지층에 구조물의 하중을 전달함으로써 주변 지반으로의 침하 영향을 최소화할 수 있는 말뚝기초의 설치가 증가되고 있다. 말뚝기초의 설치공법으로는 말뚝의 두부를 해머로 항타하는 타입공법과 오거(Auger)를 사용하여 굴착한 후 말뚝을 설치하는 매입공법이 사용되고 있다. 타입공법의 경우 말뚝의 지지력 확인이 가능하고, 매입공법에 비해 저렴한 공사비와 짧은 공기로 경제성을 확보할 수 있는 장점으로 인하여 많은 현장에 적용되었으나, 1994년 제정된 소음진동규제법에 따른 규제로 도심지에서의 사용이 어려운 문제로 인하여 매입공법의 시공이 주로 이루어지고 있다(Song, 2017). 매입공법은 지반 천공시 사용하는 장비, 외부 케이싱의 사용여부, 최종항타 여부에 따라 선굴착 후경타공법(Preboring Driving Method), DRA(Double Rod Auger)공법 및 PRD(Precussion Rotary Drill)공법과 같은 내부굴착후 최종항타 공법, SIG(Super Injection Grouting)공법 및 RJP(Rodin Jet Pile)공법과 같은 제트그라우팅에 의한 선단확근 공법, 선굴착 후선단근공법으로 구분된다. 이러한 공법의 경우 지반의 굴착에 따른 지반의 교란영향 최소화 및 말뚝의 주변마찰력 확보를 위하여 보통 포틀랜드시멘트(OPC, Ordinary Portland Cement)가 일반적으로 매입말뚝의 선단 및 주면고정액으로 사용되고 있다. 시멘트풀의 주 재료로 사용되는 보통 포틀랜드시멘트의 경우, 생산과정 중 약 1,500℃ 이상의 온도에서 진행되는 소성공정 과정에서 다량의 이산화탄소(CO₂)를 배출하는 문제로 인하여 환경위해산업으로 점차 인식되고 있으며, 이에 따라 국내·외 시멘트 제조업체들은 이소성 원료의 사용과 CaO 함유 부원료의 사용 등의 방법을 통해 이산화탄소의 발생량 저감을 이루고자 노력하고 있다(Lee, 2016). 그러나 대부분의 연구는 대체연료사용 및 친환경 시멘트의 개발에 대한 연구가 주로 진행되고 있고, 시멘트를 산업부산물로 일부 치환한 시멘트 및 콘크리트의 특성에 관한 연구가 한정적

으로 이루어지고 있어 기존 시멘트 대비 경제성 및 친환경성을 확보할 수 있는 시멘트 대체재의 개발이 필요한 실정이다(Lee, 2012).

Woo(2015)의 연구에 따르면, 화력발전의 경우 최근 유연탄(Bituminous Coal)과 같은 고품위탄의 수급이 점차 어려워짐에 따라 저품위탄인 아역청탄(Subbituminous Coal)을 사용하는 경우가 점차 증가하고 있고, 이로 인해 연료의 종류, 수분 함유량 등 재료에 의한 영향이 적고, 저품위탄 및 고유황탄(High-Sulfur Coal), 고품연료(SRF, Solid Refuse Fuel) 등 다양한 가연성 물질을 연료로 사용할 수 있는 순환 유동층 보일러 연소방식의 화력발전소의 설치가 증가하고 있다. 그러나 순환 유동층 보일러의 연소방식을 적용하는 경우, 석회석을 이용한 노 내 탈황을 실시하기 때문에 연소재의 반응성 CaO 및 Free CaO 화합물 성분이 높아 Fly ash 표준산업규격(KS L 5405)을 만족시키지 못하여 재활용률이 저조한 실정이며, 이에 따라 순환 유동층 보일러 연소재를 대량으로 활용할 수 있는 새로운 기술에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 재활용에 어려움을 겪고 있는 순환 유동층 보일러의 연소재를 고로슬래그의 알칼리 활성화 반응 자극제로 활용하여 시멘트와 동일한 경화반응을 유도할 수 있고, 이에 따라 매입말뚝의 주면고정액으로 사용되고 있는 보통 포틀랜드시멘트(OPC)를 대체할 수 있는 새로운 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)을 시멘트밀크 공법의 주면고정액으로 적용하여 시험시공을 실시하고, 정재하시험 및 동재하시험을 진행하여 새로운 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)의 성능평가를 보통 포틀랜드시멘트(OPC)와 비교하여 실시하였다.

2. 사용재료

2.1 구성성분

매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)은 순환 유동층 보일러의 연소시 발생하는 고칼슘 연소재(다량의 Free CaO 함유)를 고로슬래그 미분말의 알칼리 자극제 활용한 비소성 무 시멘트 무기결합재이다. Table 1에 본 연구에

Table 1. Chemical constituents of materials

Material	Chemical constituents					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
ZA-Soil	51.80	25.50	10.40	0.72	2.22	7.75
Ordinary Portland Cement	67.10	18.50	3.76	1.96	2.38	3.84

사용된 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)과 보통 포틀랜드시멘트에 대한 XRF(X-ray Fluorescence) 분석 결과를 비교하여 나타내었다.

2.2 재료적 특성

1) 압축강도

새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)에 대한 압축강도를 측정하기 위해 국내의 시험기준인 “휨 강도 시험한 공시체로 콘크리트의 압축강도를 시험하는 방법(KS F 2413)”과 “시멘트의 강도 시험 방법(KS L 679)”를 참고하여 물/결합재비 50%의 시편(B=4cm, H=4cm, L=16cm)을 제작하여 실내시험을 실시하였다. 일반적으로 매입말뚝의 주면고정액은 물/결합재비가 83%로 적용되고 있고, 잔골재 혼합되지 않으며, 현장에서 주입 후 다짐이 실시되지 않는 시험방법을 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)에 대하여 현장토사와의 반응성을 시멘트와 비교하여 판단하기 위해 흙 재료와 혼합한 후 다짐을 실시한 시편에 대해 압축강도를 측정하였고, 양생일에 따른 압축강도 측정결과를 Table 2와 Fig. 1에 나타내었다. 시험결과 보통 포틀랜드시멘트의 압축강도가 모든 재령일에서 가장 큰 것으로 나타났고, 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)은 보통 포틀랜드시멘트 대비

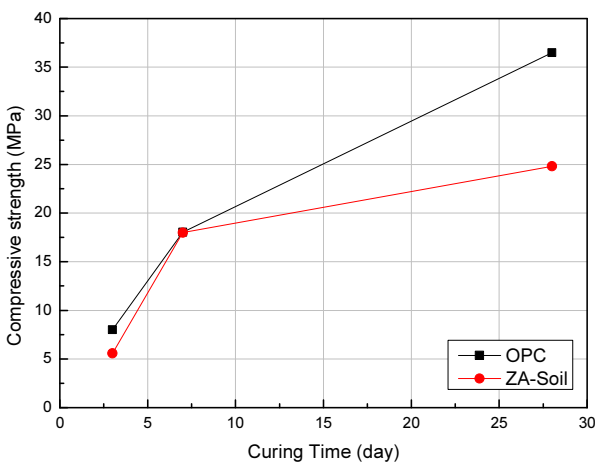


Fig. 1. Compressive strength of material

Table 2. Chemical constituents of materials

Material	Water/Binder (%)	Compressive strength (MPa)		
		3days	7days	28days
ZA-Soil	50	5.58	18.00	24.80
OPC	50	8.00	18.04	36.49

약 68.0%의 압축강도를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 본 시험결과는 물/결합재비의 변화와 잔골재의 혼합과 다짐 유무에 따라 변화할 수 있으며, 이에 대한 추가적인 검토를 수행중에 있다.

2) 체적수축

매입말뚝의 주면고정액과 그라우트재로 주로 사용되고 있는 시멘트의 경우, 수화과정에서 발생하는 건조수축에 따른 체적수축으로 인하여 균열 및 마찰저항의 감소가 발생할 수 있다. 기존의 연구결과(Shin, 2014)에 따르면 체적수축을 저감을 위해 팽창재를 첨가하는 경우, 양생기간에 따라 약 1.3~4.5배의 마찰저항이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 시멘트와 비교하여 매입말뚝 주면고정액의 체적수축 저감을 평가하기 위해 페이스트 상태로 혼합한 후 피펫을 이용하여 수화반응 중 발생하는 체적수축을 평가하는 “Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste”(ASTM C 1608)를 사용하여 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)에 대한 체적수축 영향을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 시험결과, 새로운 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)의 체적변화는 페이스트 혼합 직후 10시간까지는 팽창하였고, 10시간 이후부터는 지속적으로 수축하는 것으로 나타났으며, 발생한 체적수축량은 약 2.8%로 약 6.8% 발생한 보통 포틀랜드시멘트에 비해 매우 적은 것으로 나타났다. Seo et al.(2017)의 연구에 따르면 순환 유동층 보일러의 연소재에 포함된 Free CaO성분은 물과 반응하여 팽창성 반응이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 특성으로 인하여 새로운 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)의 경우 체적이 팽창한

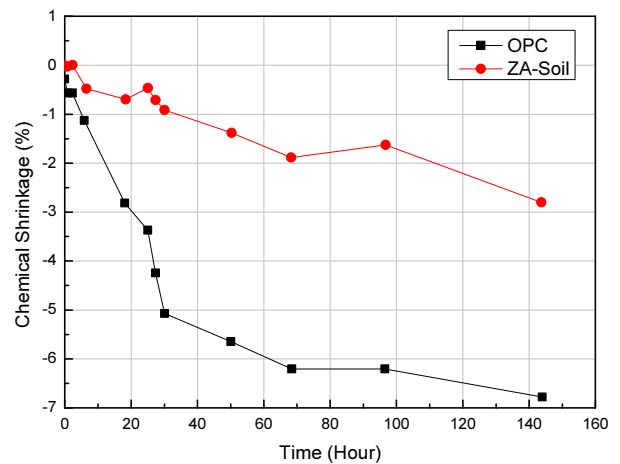


Fig. 2. Test result of chemical shrinkage

후 수화반응에 따른 체적 수축이 발생하는 것으로 판단된다.

3) 유동성

새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)의 유동성을 파악하기 위해 “Controlled Low-Strength Materials(ACI Committee 229, 2005)”를 참고하여 시험을 진행하였다. 시험은 직경(D) 7.6cm, 높이(H) 15.2cm의 원형실린더 몰드 안에 주변고정액을 몰드를 들어올려 30초 후 지름의 가장 큰 방향과 수직 방향을 측정하여 평균 플로우치를 측정하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. Won et al.(2001)의 연구에 따르면 간극을 신속하고 치밀하게 메울 수 있도록 하는 동시에 재료분리 현상이 일어나지 않기 위해서는 파일채움재의 플로우치가 20~30cm인 것이 적절한 것으로 나타났다. 새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)의 플로우치를 측정한 결과, 평균 플로우치는 24.55cm로 적절한 유동성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

4) 환경적 영향

새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)를 사용시 주변 환경에 미치는 영향을 검토하기 위하여 공인인증시험 기관에 의뢰하여 “시멘트 중 6가크로뮴의 정량분석 방법(KS L 5221)”을 실시하였고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 시험결과 보통 포틀랜드시멘트의 6가크로뮴 용출량은 0.06mg/L인 것으로 나타났고, 새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)은 용출되지 않는 것으로 나타나 환경적 안정성을 확보한 것으로 판단된다.

3. 시험시공

3.1 적용공법

선굴착 후경타공법은 오거(Auger)를 사용하여 지반

Table 3. Chemical constituents of materials

Material	Flow value (cm)		
	Radial	Vertical	Average
ZA-Soil	26.75	22.35	24.55

Table 4. Chemical constituents of materials

Material	Ordinary portland cement	ZA-Soil
Leaching rate of Cr ⁶⁺	0.06mg/L	None

을 천공하여 굴착하고, 오거의 인발시 시멘트풀을 주입한 후 파일을 삽입함으로써 선단지층에서의 지지력과 말뚝 주변에서의 마찰력을 통해 파일을 지지하는 매입공법의 대표적인 공법으로, 말뚝의 설치 후 최종 경타의 여부에 따라 침설방식과 경타방식으로 구분되며 국내의 경우 시공중 적절한 품질확인을 위하여 보편적으로 경타방식이 적용되고 있다(Cho et al., 2008). 본 연구에서는 새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)의 성능을 보통 포틀랜드시멘트(OPC)와 비교평가하고, 적용성을 검토하기 위해 국내 건설현장에서 보편적으로 적용되고 있는 경타방식의 시멘트밀크 공법을 사용하였다.

3.2 현장조건

새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)에 대한 현장에서의 성능평가를 위하여 시험시공이 이루어진 현장은 전주-완주 혁신도시에 위치한 공공임대아파트 건설공



Fig. 3. Location of Jeonju-Wanju innocity

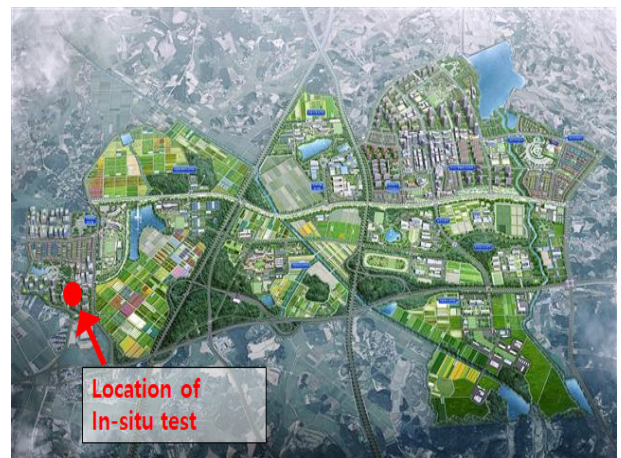


Fig. 4. Location of in-situ test in innocity

사 현장으로 Fig. 3~4에 시험시공 현장의 위치를 나타내었고, Fig. 5에는 지반조사 결과를 나타내었다. 새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)의 시험시공이 이루어진 지반은 BH-3, BH-4, BH-7, BH-8로 지반조사 결과

해당 지반은 N치가 5~7인 매립층과 N치 6~19인 붕적층, N치 6~50인 풍화토, N치 50인 풍화암의 순서로 구성되어 있는 것으로 나타났다.

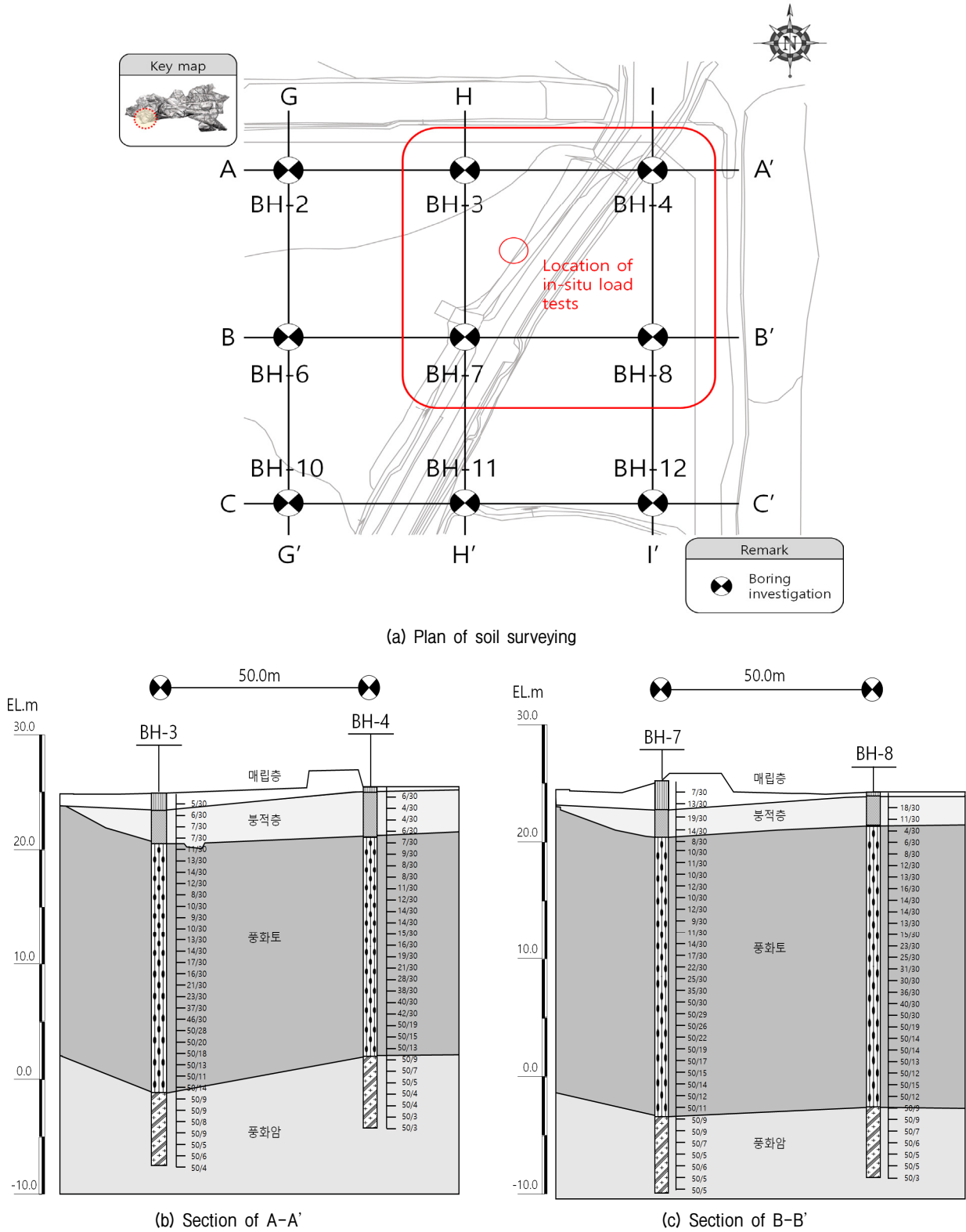


Fig. 5. Result of soil surveying

3.3 시험말뚝

새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)의 성능을 평가하기 위해 말뚝은 직경(D) 500mm의 고강도 콘크리트 파일(PHC, Pretensioned spun High strength Concrete)이 사용되었고, Table 5에 말뚝의 제원을 나타내었다. 또한, 새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)과 보통 포틀랜드시멘트(OPC)의 물-결합재비(W/B, Water/Binder)는 LH한국토지주택공사의 전문시방서에 제시되어 있는 83%를 적용하여 Fig. 6에서와 같이 시험말뚝의 설치를 진행하였다(Korea Land and Housing Corporation, 2012).

4. 재하시험 결과 및 분석

4.1 정재하시험

매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)에 대한 성능평가를 위

해 정재하시험을 실시하였고, 그 결과를 보통 포틀랜드시멘트(OPC)와 비교하여 Fig. 7~12에 나타내었다. 정재하시험에 따른 항복하중을 결정하기 위해 하중-침하곡선(Pressure-Settlement curve)과 양대수능을 적용한 하중-침하곡선(log P-log S curve)을 비교한 결과, 새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)과 보통 포틀랜드시멘트(OPC) 모두 뚜렷한 항복점을 나타내지 않았고, 대수능을 적용한 시간과 침하곡선(S-log t curve)에서도 모든 하중단계에서 직선으로 나타나 최대재하하중인 2,700kN을 항복하중으로 가정할 때 안전율 2.0을 고려하여 허용 지지력은 1,350kN로 동일한 것으로 분석되었다.

또한 정재하시험을 실시한 결과 새로운 매입말뚝 주변고정액(ZA-Soil)의 전 침하량은 6.97mm이고, 보통 포틀랜드시멘트의 전 침하량은 7.83mm로 나타나 Terzaghi and Peck(1967)이 제안한 25.40mm(=1inch) 이내를 침하량을 보이는 것으로 나타났다.



Fig. 6. Process of Installation of test pile

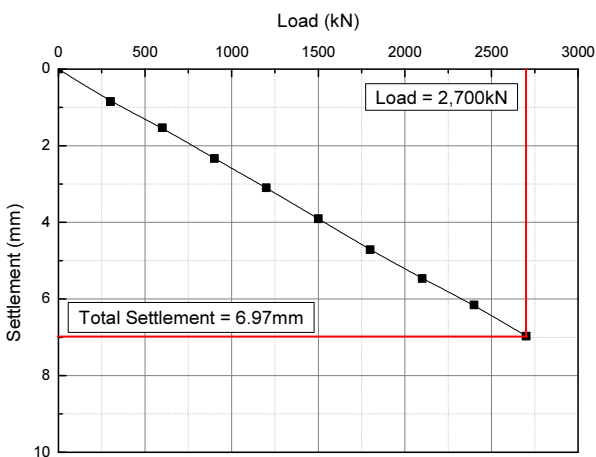


Fig. 7. P-S curve of ZA-Soil

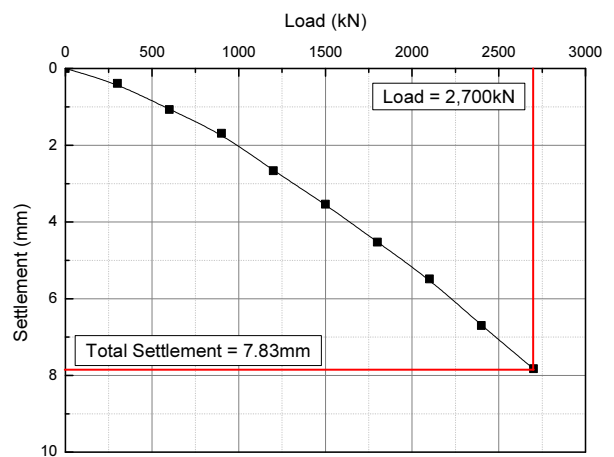


Fig. 8. P-S curve of OPC

Table 5. Properties of test pile

Material	Pile type	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Penetration depth (m)
ZA-Soil	PHC Pile	500	80	23.0
OPC	PHC Pile	500	80	25.2

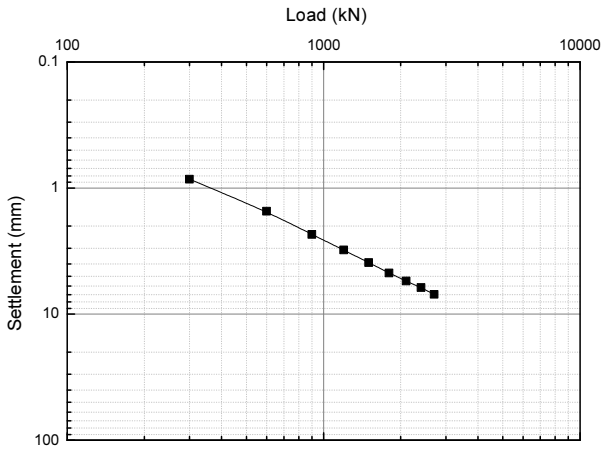


Fig. 9. log P-log S curve of ZA-Soil

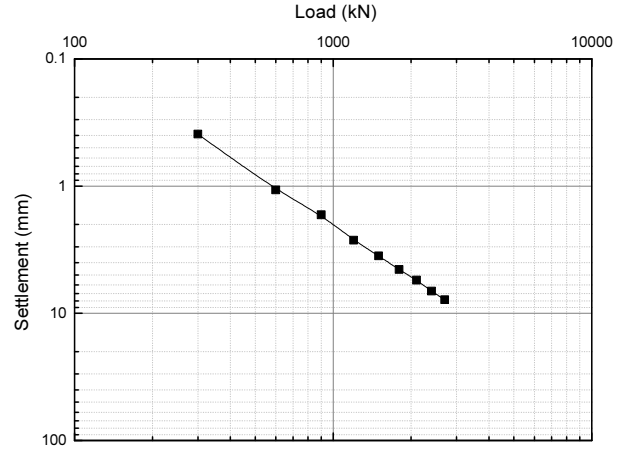


Fig. 10. log P-log S curve of OPC

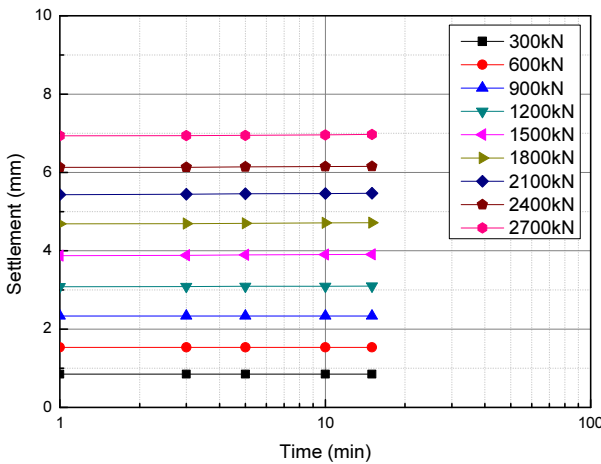


Fig. 11. S-log t curve of ZA-Soil

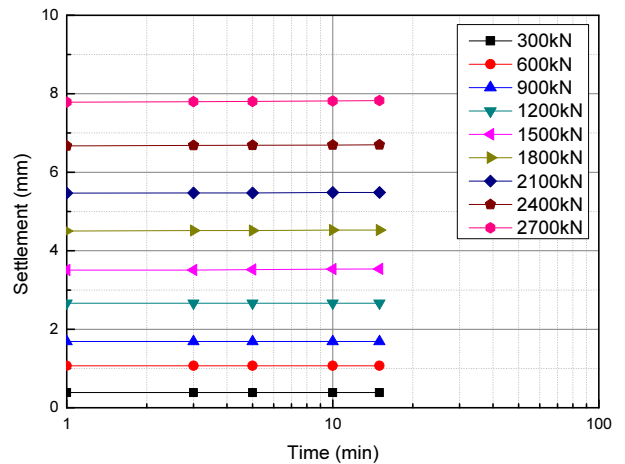


Fig. 12. S-log t curve of OPC

4.2 동재하시험

새로운 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)에 대한 정확한 성능평가를 위해 재령 7일에 대한 재향타 동재하시험 (Restrike)을 실시한 후 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program)분석을 실시하였고, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 시험결과, 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)의 허용지지력은 1,368.36kN으로 보통 포틀랜드시멘트의 1,349.28kN과 비교하여 유사한 값을 보이는 것으로 나타났고, 이를 통해 새로운 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)

이 매입말뚝의 주면고정액으로써 보통 포틀랜드시멘트와 동등한 효과를 보이고 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 순환 유동층 보일러의 연소재를 고로 슬래그의 알칼리 활성화 반응 자극제로 활용하여 대량으로 활용할 수 있도록 개발한 새로운 매입말뚝 주면고정액(ZA-Soil)을 시멘트밀크 공법의 주면고정액으로 사용하여 시험시공과 정재하시험 및 동재하시험을 통한

Table 6. Results of of dynamic load test

Material	Penetration depth (m)	CSX (MPa)	CSB (MPa)	RMX (kN)	EMX (kN·m)	Skin friction (kN)	End bearing capacity (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)	Allowable bearing capacity (kN)	Remark
ZA-Soil	23.0	30.3	13.3	3,538	46.2	375.0	3,045.9	3,420.9	1,368.4	Restrike
OPC	25.2	21.9	28.8	3,345	44.7	360.4	3,012.8	3,373.2	1,349.3	Restrike

매입말뚝 주면고정액의 성능평가를 실시하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)의 재료적 특성을 파악한 결과, 재령 28일 기준 압축강도는 24.80 MPa로 보통 포틀랜드시멘트의 압축강도인 36.49MPa의 68.0%에 해당하는 것으로 나타나 강도적 측면에서는 불리한 것으로 나타났다.
- (2) 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)을 사용한 말뚝에 대해 정재하시험을 실시한 결과, 허용지지력은 1,350kN로 보통 포틀랜드시멘트를 주면고정액으로 사용한 경우와 동일한 결과를 나타내었고, 최종침하량의 차이는 있었으나 전 침하량이 6.97mm로 Terzaghi and Peck이 제안한 기준을 만족시키고 있는 것으로 확인되어 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)이 매입말뚝의 주면고정액으로써 보통 포틀랜드시멘트와 동등한 효과를 보이고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)을 사용한 말뚝에 대해 동재하시험을 실시한 결과, 허용지지력은 1,368.36kN로 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 말뚝의 1,349.28MPa와 비교하여 비슷한 수치를 나타내었고, 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)이 매입말뚝의 주면고정액으로써 보통 포틀랜드시멘트와 동등한 효과를 보이고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경산업선진화기술개발사업(과제번호:201600015003)의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

1. ACI Committee 229 (2005), "Controlled Low-Strength Materials".
2. ASTM C 1608 (2012), "Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste", ASTM International.
3. Cho, C. W., Lee, W. C., and Jeong, S. S. (2008), "State of the Art and Practice of the Embedded Precast Pile Methods in Korea", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.2008, pp.559-566.
4. Korea Land and Housing Corporation (2012), Specifications of Administrative City Construction.
5. KS F 2413 (2015), "Method of Test for Compressive Strength of Concrete using Portions of Beams broken Flexure", Korea Standards Association.
6. KS L 5405 (2016), "Fly Ash", Korea Standards Association.
7. Lee, J. K. (2016), "Cement Industry and Latest Research Trend", *Ceramist*, Vol.19, No.2, pp.59-64.
8. Lee, Y. S. (2012), "An Experimental Study on the Quality Properties of Concrete using Dredged Soil", Master Thesis, Hanbat National University.
9. Korea Land and Housing Corporation (2012), "LH Guide Specifications".
10. Seo, J. H., Baek, C. S., Kim, Y. J., Choi, M. K., Cho, K. H., and Ahn, J. W. (2017), "Study on the Free CaO Analysis of Coal Ash in the Domestic Circulating Fluidized Bed Combustion using ethylene glycol method", *Journal of Energy Engineering*, Vol.26, No.1, pp.1-8.
11. Shin, H. B. (2014), "Effect of Expansion Grout on Frictional Resistance", Doctor Thesis, Myongji University.
12. Song, S. H. (2017), "A Study on the Evaluation of Practical Application of PHC Pile-Filling Material utilizing High Calcium Fly Ash", Master Thesis, Chonbuk National University.
13. Terzaghi and Peck (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley, New York, 2nd Edition.
14. Won, J. P. and Lee, Y. S. (2001), "Properties of Controlled Low-Strength Material Containing Bottom Ash", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.13, No.3, pp.294-300.
15. Woo, Y. Y. (2015) "Characteristics and Evaluation of Circulating Fluidized Bed Boiler Ash", Doctor Thesis, Kunsan National University.

Received : November 27th, 2017

Revised : June 7th, 2018

Accepted : June 11th, 2018