

고칼슘 연소재를 이용한 매입말뚝의 주면고정액에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Filling Material for Bored Pile Using High Calcium Ash

송상훤¹, 임양현², 서세관³, 조대성^{4*}

Sang-Hwon Song¹, Yang-Hyun Lim², Se-Gwan Seo³, Dae-Sung Cho^{4*}

¹Nonmember, Professor, Department of Architecture, Collage of Jeonju Vision, 235 Cheonjam-Ro, Wansan-Gu, Jeonju-Si, Jeollabuk-Do, 55069, Republic of Korea

²Nonmember, Researcher, Daewoong Company Ltd., 827 Yeosun-Ro, Yulchon-Myeon, Yeosu-Si, Jeollanam-Do, 59601, Republic of Korea

³Member, Researcher, Zian Company Ltd, 8th Woosuk University Headquarters Building, 443 Samrye-Ro, Samrye-Eup, Wanju-Gun, Jeollabuk-Do, 55338, Republic of Korea

⁴Student Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, 567 Baekje-Daero, Deokjin-Gu, Jeonju-Si, Jeollabuk-Do, 54896, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, laboratory tests were performed to evaluate for new filling materials (ZA-Soil) for bored pile that were developed using by high calcium ash. As a result of laboratory test, the uniaxial compression strength of 2 types of ZA-Soil are shown 68.0% and 64.6% compared to ordinary portland cement. And it have a suitable flowability and environmental stability. Also, after 28days, uniaxial compression strength of material mixed with soil and high strength filling material (ZA-Soil 1) for bored pile is 1.10~1.23 times bigger than material mixed with ordinary portland cement.

요 지

본 연구에서는 순환 유동층 보일러의 고칼슘 연소재를 활용하여 개발한 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)에 대한 성능을 평가하기 위해 실내시험을 실시하였고, 보통 포틀랜드시멘트와의 비교평가를 실시하였다. 실내시험 결과, 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)의 압축강도는 보통 포틀랜드시멘트 대비 68.0%와 64.6%인 것으로 나타났고, 적절한 유동성과 환경적 안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)을 흙 재료와 혼합한 경우 재령 28일에서의 압축강도가 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 경우의 압축강도에 비해 1.10~1.23배 큰 것으로 나타나 강도증진효과가 우수한 것으로 나타났다.

Keywords : High calcium ash, Pile-Filling material, Laboratory test, Uniaxial compression strength

1. 서 론

도심지에서의 구조물 설치를 위한 시공이 이루어지는 경우, 주변 지반의 침하에 따른 영향을 최소화하고, 구조물의 안정성을 확실하게 확보하기 위해 말뚝기초를 시공하는 사례가 증가하고 있다. 말뚝기초를 설치하는 공법으

로는 말뚝 두부를 해머로 향타하여 말뚝을 설치하는 타입 공법과 지반을 오거(Auger)를 사용하여 굴착한 후 말뚝을 설치하는 매입공법이 사용되고 있다. 타입공법의 경우 말뚝의 지지력 확인이 가능하고, 매입공법에 비해 경제성을 확보할 수 있는 장점으로 인하여 많은 현장에 적용되었으나, 1994년 제정된 소음·진동규제법에 따른 규제로 도심지에서의 사용이 어려운 단점으로 인하여 매입공법의 시공이 주로 이루어지고 있다(Song, 2017).

매입공법의 경우, 지반을 선굴착한 후 굴착에 따른 주면

Received 7 Jul. 2017, Revised 23 Oct. 2017, Accepted 3 Nov. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-10-8721-7417; Fax: +82-63-270-2421

E-mail address: sculptart@jbnu.ac.kr (D. S. Cho)

마찰력의 감소를 보강하기 위해 시멘트풀을 주입하고 있으며, 많은 양의 보통 포틀랜드시멘트(OPC, Ordinary Portland Cement)가 시멘트풀의 재료로 사용되고 있다. 시멘트풀 제조에 사용되는 보통 포틀랜드시멘트의 경우, 생산과정에서 약 1,500°C이상의 온도에서 진행되는 소성공정으로 인하여 다량의 이산화탄소(CO₂)를 배출하기 때문에 환경위해 산업으로 점차 인식되고 있으며, 이에 따라 국내·외 시멘트 제조업체들은 시멘트 생산시 발생하는 이산화탄소의 감축을 위한 기술개발을 진행하고 있다. 그러나 대부분의 연구는 대체연료사용 및 친환경 시멘트의 개발에 대한 연구가 주로 진행되고 있고, 시멘트를 산업부산물로 일부 치환한 시멘트 및 콘크리트의 특성에 관한 연구가 한정적으로 이루어지고 있어 기존 시멘트 대비 경제성 및 친환경성을 확보할 수 있는 시멘트 대체재의 개발이 필요한 실정이다 (Lee, 2012).

한편, 화력발전의 경우 최근 유연탄(Bituminous Coal)과 같은 고품위탄의 수급이 점차 어려워짐에 따라 저품위탄인 아역청탄(Subbituminous Coal)을 사용하는 경우가 점차 증가하고 있다. 이로 인해 연료의 종류, 수분 함유량 등의 재료에 의한 영향이 적고, 저품위탄 및 고유황탄(High-Sulfur Coal), 고형연료(SRF, Solid Refuse Fuel) 등 다양한 가연성 물질을 연료로써 활용이 가능한 순환 유동층 보일러 연소 방식의 화력발전소의 설치가 증가하고 있다(Woo, 2015). 그러나 순환 유동층 보일러 연소방식을 적용하는 경우, 기존의 연소방식에 비해 CaO 함량이 높아 Fly ash 표준산업 규격(KS L 5405)에 만족하지 못하여 재활용률이 저조한 실정이며, 순환 유동층 보일러의 고칼슘 연소재를 대량으로 활용할 수 있는 새로운 기술에 대한 연구가 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 순환 유동층 보일러의 고칼슘 연소재를 고로슬래그의 알칼리 활성화 반응의 자극제로 활용하여 개발한 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)에 대한 실내시험을 수행하였고, 매입말뚝의 주면고정액으로 사용되고 있는 보통 포틀랜드시멘트(OPC)와의 비교 평가를 실시하여 매입말뚝의 주면고정액으로서 지반보강용 시멘트를 대체하기 위한 성능을 평가하고자 하였다.

2. 실내시험

2.1 사용재료

2.1.1 ZA-Soil

본 연구에 사용된 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)은 일반 미분탄 연소 보일러(PC, Pulverized Coal)에서 발생하는 F급 석탄재와는 달리 국내 산업기준인 “플라이 애쉬(KS L 5405)”에 제시된 물리·화학적 성능을 만족시키지 못하여 콘크리트의 혼화재료로서 활용이 어렵고, 다량의 CaO를 포함하고 있어 포졸란 반응(Pozzolanic reaction)을 유발할 수 있는 순환 유동층 보일러의 연소방식으로 인하여 발생한 고칼슘 연소재를 고로슬래그 미분말의 자극제로 사용한 제품이다. 본 연구에서는 다양한 지반 상황을 고려할 수 있도록 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)을 사용하였으며, Table 1에 본 연구에 사용된 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil 1, 2)와 보통 포틀랜드 시멘트에 대한 XRF(X-ray Fluorescence) 분석결과를 비교하여 나타내었다.

2.1.2 원지반토

매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)을 적용하는 경우, 현장 토사와의 반응성을 검토하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 전북 완주군 봉동읍 일원에서 흙을 채취하여 사용하였고, 물리적 시험을 실시하여 그 결과를 시험결과를 Table 2에 나타내었고, 입도분포곡선과 다짐곡선을 Fig. 1와 Fig. 2에 각각 나타내었다.

2.2 시험조건

2.2.1 시편 제작

매입말뚝의 주면고정액에 대한 압축강도를 측정하기 위해 국내의 시험기준인 “힘 강도 시험한 공시체로 콘크리트의 압축강도를 시험하는 방법(KS F 2413)”을 참고하여 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고

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 1	51.80	25.50	10.40	0.72	2.22	7.75
ZA-Soil 2	56.40	16.20	9.01	8.56	2.83	1.85
Ordinary Portland Cement	67.10	18.50	3.76	1.96	2.38	3.84

Table 2. Physical properties of soil

Gravity specific	Liquid limit (%)	Plastic index (%)	Particle size distribution				USCS	γ_{dmax} (kN/m ³)	ω_{opt} (%)
			4,75mm	2,00mm	0,425mm	0,075mm			
2,639	33,2	Non Plastic	86,8	76,9	55,5	33,5	SM	18,59	11,1

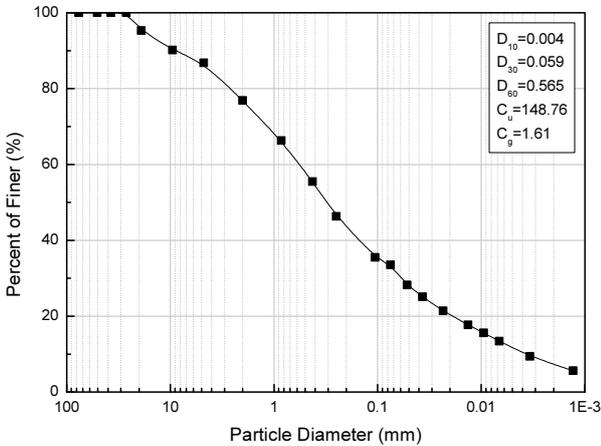


Fig. 1. Particle size distribution curve

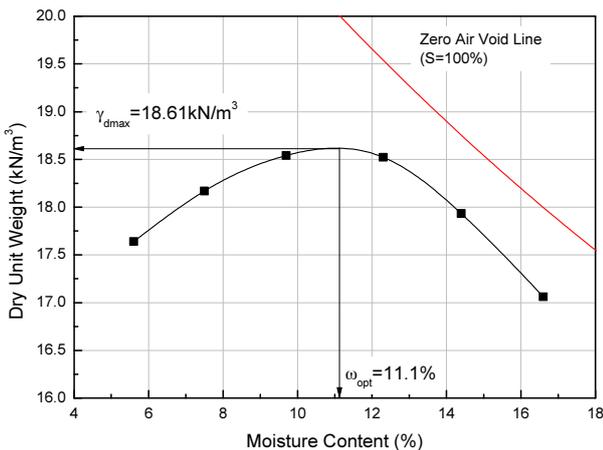


Fig. 2. Compaction test result (D method)

정액(ZA-Soil 2), 보통 포틀랜드시멘트에 대한 시편(B=4cm, H=4cm, L=16cm)을 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 제작하였고, 건조수축을 저감시키기 위해 수중양생을 실시하였다. 또한, 매입말뚝의 주면고정액과 현장토사와의 반응성을 검토하기 위해 “시험실에서 흙 시멘트의 압축 및 휨강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법(KS F 2329)”과 “흙 시멘트의 압축강도 시험방법(KS F 2328)” 및 “흙의 다짐 시험 방법(KS F 2312)”을 참고하여 직경(D) 5cm, 높이(H) 10cm의 몰드에 흙 재료와 매입말뚝의 주면고정액이 혼합된 시료를 3층으로 채운 후 D다짐 에너지(약 2470



Fig. 3. Depositing pile-filling materials in mold

kN·m³)를 고려하여 각 층마다 다짐을 실시하였고, 스패출러를 사용하여 몰드 상부의 표면을 정리한 후 컷팅과 수중양생을 실시하여 시편의 제작을 완료하였으며, 시료 제작과정을 정리하여 Fig. 4에 나타내었다.

2.2.2 배합 조건

일본으로부터 SIP공법이 1987년에 도입되면서 일반적으로 물/시멘트비(W/C)는 계산의 편의성으로 인하여 1m³ 당 시멘트 880kg, 물 730L의 비율인 83%가 주로 사용되고 있고, 투수성이 큰 사질토지반에서는 말뚝기초의 주변부를 충전하는 데 많은 양의 매입말뚝의 주면고정액과 시간이 소요되는 문제로 인하여 부배합 상태의 매입말뚝의 주면고정액을 사용하고 있다(Korea Land and Housing Corporation, 2012, Hong et al., 2008). 본 연구에서는 매입말뚝의 주면고정액만의 성능을 확인하기 위해 물/고화재비(W/B)를 “시멘트의 강도 시험 방법(KS L 679)”에 제시된 물/시멘트비(W/C)를 참고하여 50%로 적용하였다. 또한, 흙 재료와 매입말뚝용 주면고정액을 혼합한 재료의 물/고화재비(W/B)는 LH한국토지주택공사의 전문시방서에 제시되어 있고, 현장에서 일반적으로 적용되고 있는 83%를 적용하였으며, 3일, 7일, 28일간 양생을 실시하여 양생일에 따른 강도변화를 파악하고자 하였고, Table 3에 배합 조건을 나타내었다.

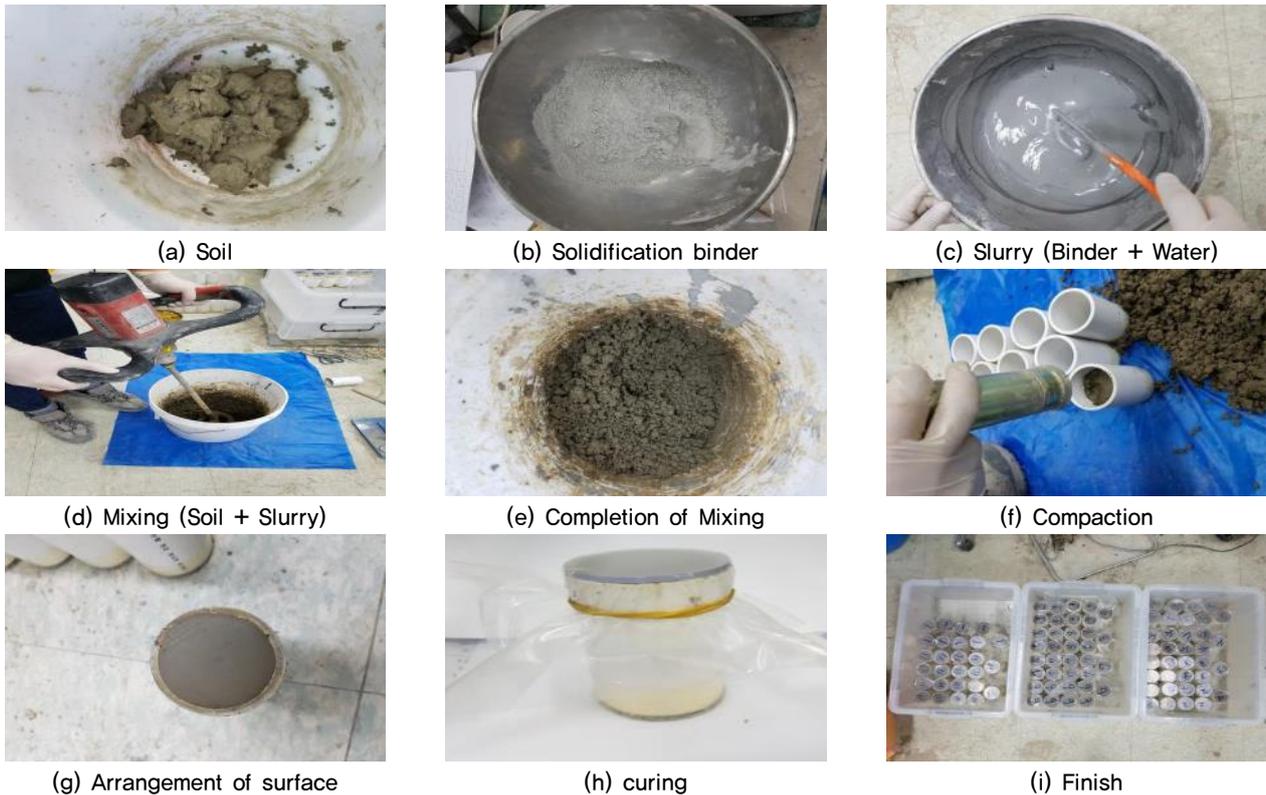


Fig. 4. Making process of specimen (Mixed with soil and pile-filling material)

Table 3. Mixing ratio of binder materials

Binder material	Mixing ratio (Binder slurry : Soil)	Water/Binder (%)	Curing time (days)
ZA-Soil 1	100 : 0	50	3, 7, 28
	100 : 50	83	
	100 : 60		
	100 : 70		
	100 : 100		
ZA-Soil 2	Same condition as ZA-Soil 1		
Ordinary Portland Cement			

3. 시험결과 및 분석

3.1 매입말뚝의 주면고정액 종류에 따른 실내시험 결과

매입말뚝의 주면고정액 종류에 따른 압축시험의 결과를 Table 4와 Fig. 5에 나타내었다. 시험결과 보통 포틀랜드시멘트의 압축강도가 모든 재령일에서 가장 큰 것으로 나타났고, 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)은 보통 포틀랜드시멘트 대비 약 68.0%, 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)은 64.6%의 압축강도를 보이는 것으로 나타나 강도측면에서 취약한 것으로 나타났다.

현장에서는 매입말뚝의 주면고정액으로 시멘트를 사용

Table 4. Test result of compressive strength

Binder material	Compressive Strength (MPa)		
	3 days	7 days	28 days
ZA-Soil 1	5.58	18.00	24.80
ZA-Soil 2	5.64	16.51	23.58
Ordinary Portland Cement	8.00	18.04	36.49

하는 경우, 수화과정 중 발생하는 체적수축을 방지하기 위해 부배합을 실시하거나 벤토나이트 등의 수축방지제를 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 강도측면 뿐만 아니라 체적수축의 저감 영향을 평가하기 위해 매입말뚝의 주면고정액을 페이스트 상태로 혼합한 후 피펫을 이용하여

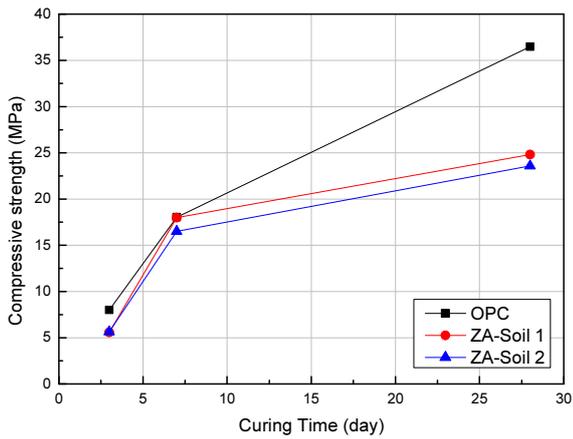


Fig. 5. Test result of compressive strength

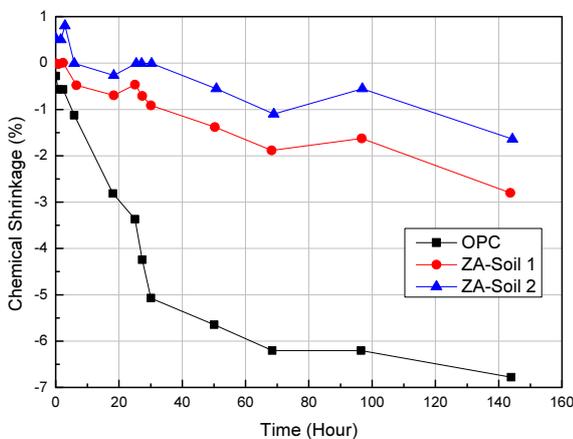


Fig. 6. Test result of chemical shrinkage

수화반응 중 발생하는 체적수축을 평가하는 “Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste”(ASTM C 1608)을 사용하여 측정을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험결과, 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)의 수화반응 중 발생하는 체적변화는 혼합 후 10시간까지 체적이 팽창한 후 수축하는 것으로 나타났고, 발생한 체적 수축량은 보통 포트랜드시멘트에 비해 매우 적은 것으로 나타났다. 이는 매입말뚝의 주면고정액에 사용되는 순환 유동층 보일러의 고칼슘 연소재에 포함된 CaO성분이 물과 반응하여 Ca(OH)₂를 형성하는 포졸란 반응으로 인하여 발생하는 체적 팽창 때문인 것으로 판단되며, 이후 포졸란 반응이 종료됨에 따라 수화반응으로 인한 수축이 발

Table 6. Test result of Flowability

Binder material	Ordinary Portland Cement	ZA-Soil 2	ZA-Soil 2
Leaching rate of Cr ⁶⁺	0.06 mg/L	None	None

Table 5. Test result of Flowability

Binder material	Flow value (cm)		
	Radial	Vertical	Average
ZA-Soil 1	26,75	22,35	24,55
ZA-Soil 2	28,05	26,60	27,33

생하는 것으로 판단된다. 또한, 매입말뚝의 주면고정액의 경우, 간극을 신속하고 치밀하게 메울 수 있도록 하는 동시에 재료분리 현상이 일어나지 않도록 플로우치가 20~30cm 이내여야 한다(Won et al., 2001). 매입말뚝의 주면고정액의 유동성을 파악하기 위해 “Controlled Low-Strength Materials(ACI Committee 229, 2005)”를 참고하여 직경(D) 7.6cm, 높이(H) 15.2cm의 원형실린더 몰드 안에 매입말뚝의 주면고정액을 채우고 몰드를 들어올려 30초 후 지름의 가장 큰 방향과 수직 방향을 측정하여 평균 플로우치를 측정하는 시험을 실시하였고, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 시험결과 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)의 평균 플로우치는 24.55cm이고, 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)의 평균 플로우치는 27.33cm으로 나타나 적절한 유동성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

또한 환경에 미치는 영향을 검토하기 위하여 공인인증 시험기관에 의뢰하여 “시멘트 중 6가크로뮴의 정량분석 방법(KS L 5221)”을 실시하였고, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 시험결과, 보통 포트랜드시멘트의 6가크로뮴 용출량은 0.06mg/L인 것으로 나타났고, 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)에서는 용출되지 않은 것으로 나타나, 환경적 안정성을 확보한 것으로 판단된다.

3.2 흙 재료와 매입말뚝의 주면고정액이 혼합된 재료의 대한 실내시험 결과

흙 재료와 매입말뚝의 주면고정액을 각각의 혼합비로 혼합한 재료에 대해 압축시험을 실시하였고, 시험결과를 Table 7과 Figs. 7~10에 나타내었다.

압축시험 결과, 보통 포트랜드시멘트와 흙 재료를 혼합한 경우 재령 3일의 압축강도는 12.5~14.3MPa, 재령 7일에서의 압축강도는 19.1~21.6MPa로 나타나 매입말뚝의

Table 7. Test result of compressive strength

Binder material	Curing Time (day)	Mixing Ratio (Binder Slurry : Soil)			
		100 : 50	100 : 60	100 : 70	100 : 100
ZA-Soil 1	3	17,0 MPa	16,0 MPa	13,2 MPa	12,6 MPa
	7	21,1 MPa	21,1 MPa	18,5 MPa	18,4 MPa
	28	22,8 MPa	25,2 MPa	23,3 MPa	21,3 MPa
ZA-Soil 2	3	4,9 MPa	7,6 MPa	8,6 MPa	7,8 MPa
	7	6,0 MPa	9,9 MPa	11,0 MPa	11,0 MPa
	28	13,2 MPa	16,0 MPa	17,0 MPa	15,3 MPa
Ordinary Portland Cement	3	12,5 MPa	13,6 MPa	14,9 MPa	14,3 MPa
	7	21,6 MPa	19,1 MPa	20,7 MPa	20,9 MPa
	28	20,3 MPa	20,4 MPa	20,4 MPa	19,5 MPa

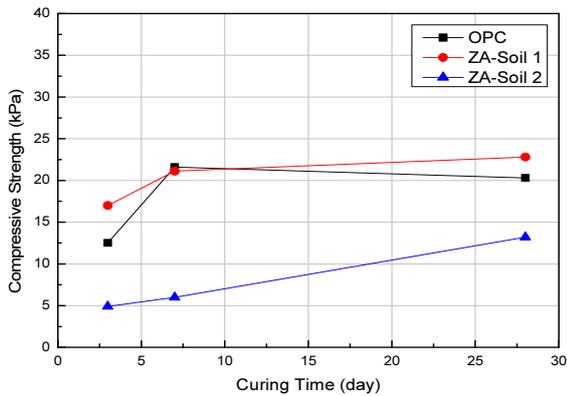


Fig. 7. Test result of compressive strength (Slurry 100 : Soil 50)

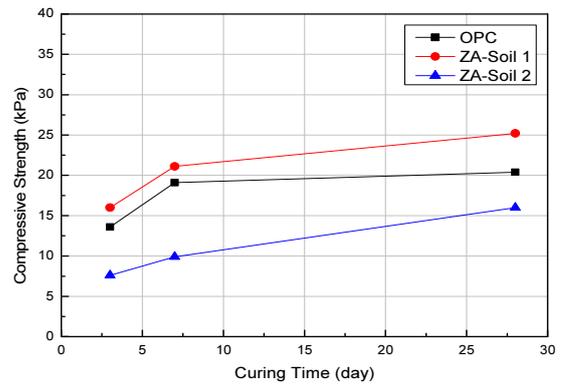


Fig. 8. Test result of compressive strength (Slurry 100 : Soil 60)

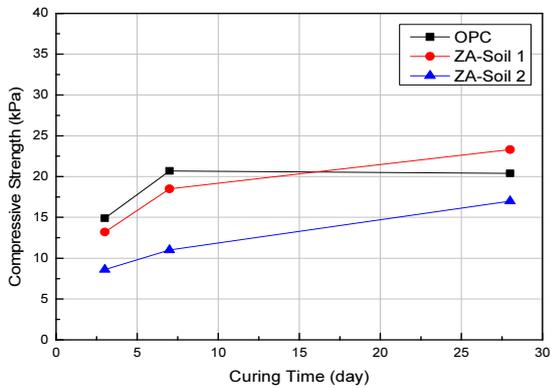


Fig. 9. Test result of compressive strength (Slurry 100 : Soil 70)

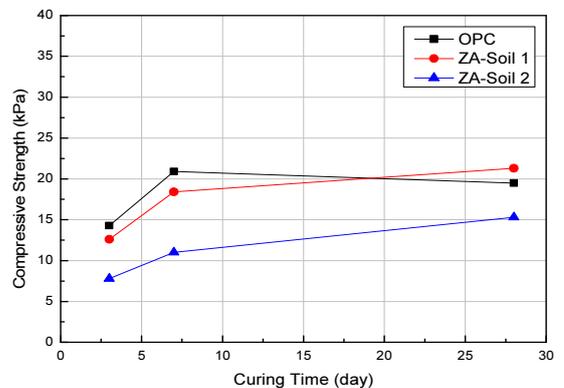


Fig. 10. Test result of compressive strength (Slurry 100 : Soil 100)

고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)을 사용한 경우에 비해 전반적으로 높은 것으로 나타났다. 또한, 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 경우에서의 재령 3일에 대한 재령 7일에서의 압축강도 증가율은 138.9~172.8%로 나타나 124.1~146.0%로 나타난 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)에 비해 높은 강도

증가율을 나타내어 혼합 초기의 반응성은 보통 포틀랜드시멘트가 우수한 것으로 나타났다. 그러나 재령 28일에서는 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)을 흙 재료와 혼합한 재료의 압축강도는 21.3~25.2MPa로 보통 포틀랜드시멘트와 흙 재료를 혼합한 재료에 비해 압축강도인 19.5~20.4MPa에 비해 약 1.10~1.23배 가량 큰 것으

로 나타났다. 또한, 보통 포틀랜드시멘트의 경우 재령 7일에 대한 재령 28일에서의 압축강도 증가율은 136.4~162.4%, 재령 7일에 대한 재령 28일에서의 압축강도 증가율은 93.3~106.8%로 나타났으나, 동일한 조건에서 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)의 압축강도 증가율은 134.1~176.5%와 108.1~125.9%인 것으로 나타나 매입말뚝의 안정성 측면에서 보통 포틀랜드시멘트를 매입말뚝의 주면고정액으로 사용한 경우에 비해 매입말뚝의 안정성을 확보하는데 유리할 것으로 판단된다. 매입말뚝의 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)를 흙 재료와 혼합한 재료의 압축강도는 재령 3일의 경우 4.9~8.6MPa, 재령 28일의 압축강도는 13.2~17.0MPa로 보통 포틀랜드시멘트에 비해 낮은 값을 보이고 있어 매입말뚝의 주면고정액으로써 보통 포틀랜드시멘트를 대체하는 데 어려울 것으로 판단되나, 재령 3일에 대한 재령 7일의 압축강도의 증가율은 196.2~269.4%, 재령 7일에 대한 재령 28일의 압축강도의 증가율은 139.1~220.0%로 가장 큰 증가를 나타내므로 시공 초기에 높은 강도가 요구되지 않고, 장기적인 측면에서 안정성을 확보할 수 있는 지하공동구 매립재, 지중송전관로의 되메움재 등으로 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 활용방법이 정리되지 않은 순환 유동층 보일러의 고갈습 연소재를 고로슬래그의 알칼리 활성화 반응의 자극제로 활용하여 개발한 새로운 매입말뚝의 주면고정액(ZA-Soil)에 대한 실내시험을 수행하였고, 현재 매입말뚝의 주면고정액으로 사용하고 있는 보통 포틀랜드시멘트와의 비교평가를 실시하기 위해 실내시험을 실시하였고, 시험결과의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 매입말뚝의 주면고정액만의 성능평가를 위해 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)에 대한 압축시험을 실시한 결과, 재령 28일에서 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)의 압축강도는 24.80 MPa, 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)의 압축강도는 23.58MPa로 나타났고, 보통 포틀랜드시멘트 대비 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)은 약 68.0%, 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)은 64.6%의 압축강도를 보이는 것으로 나타나 보통 포틀랜드시멘트에 비

해 강도 측면에서 불리한 것으로 나타났다.

- (2) 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)을 흙 재료와 혼합한 경우, 재령 3일과 재령 7일에서의 압축강도가 보통 포틀랜드시멘트를 혼합한 경우와 비교하여 대부분 작은 것으로 나타났으나, 재령 28일의 압축강도는 약 1.10~1.23배 가량 큰 것으로 나타나 매입말뚝의 안정성 측면에서 보통 포틀랜드시멘트를 매입말뚝의 주면고정액으로 사용한 경우에 비해 매입말뚝의 안정성을 확보하는데 유리하므로 보통 포틀랜드시멘트를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 매입말뚝의 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)의 압축강도는 동일한 재령일에서 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)와 보통 포틀랜드시멘트를 혼합한 모든 경우에 비해 작은 것으로 나타났고, 재령 3일에 대한 재령 7일에서의 압축강도 증가율은 196.2~269.4%, 재령 7일에 대한 재령 28일에서의 압축강도 증가율은 139.1~220.0%인 것으로 나타나 시공 초기에 높은 강도가 요구되지 않고 장기적인 측면에서 안정성을 확보할 필요가 있는 지하공동구 매립재, 지중송전관로 되메움재 등으로 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 매입말뚝의 주면고정액으로서의 체적수축과 유동성을 판단하기 위해 실내시험을 실시한 결과, 매입말뚝의 고강도 주면고정액(ZA-Soil 1)과 저강도 주면고정액(ZA-Soil 2)의 체적수축은 -3%로, 약 -6.7%의 체적수축을 나타낸 보통 포틀랜드시멘트에 비해 적게 발생하는 것으로 나타났고, 평균 플로우치는 24.55cm와 27.33cm으로 나타나 매입말뚝의 주면고정액으로서 적절한 유동성을 갖고 있는 것으로 나타났다.
- (5) 매입말뚝의 주면고정액이 환경에 미치는 영향을 판단하기 위해 6가크롬의 정량분석 시험을 시험한 결과, 6가크롬의 용출은 발생하지 않는 것으로 나타나 환경적 안정성을 확보한 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This subject is supported by Korea Ministry of Environment (MOE) as “The advancement of scientific research and technological development in environmental science program (2016000150003)”.

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. Hong, W. P., Lee, J. H., and Chai, S. G. (2008), "Bearing Capacity of SDA Augered Pile in Various Ground Depending on Water-Cement Ratio of Cement Milk", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.5, pp.37-54.
4. Korea Land and Housing Corporation (2012), Specifications of Administrative City Construction.
5. KS F 2312 (2016), "Standard Test Method for Soil Compaction", Korea Standards Association.
6. KS F 2328 (2002), "Testing Method for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders", Korea Standards Association.
7. KS F 2329 (2007), "Testing Method for Making Curing of Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory", Korea Standards Association.
8. KS F 2413 (2015), "Method of Test for Compressive Strength of Concrete using Portions of Beams broken Flexure", Korea Standards Association.
9. KS L 679 (2006). "Method of Testing Cements - Determination of Strength", Korea Standards Association.
10. KS L 5405 (2016), "Fly Ash", Korea Standards Association.
11. Lee. Y. S. (2012), "An Experimental Study on the Quality Properties of Concrete using Dredged Soil", Master Thesis, Hanbat National 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. 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.
14. Woo. Y. Y. (2015) "Characteristics and Evaluation of Circulating Fluidized Bed Boiler Ash", Doctor Thesis, Kunsan National University.