

## 매입말뚝 충전재로서 고화토의 적용성

### Applicability of Solidified Soil as a Filling Materials of Bored Pile

김기웅<sup>1\*</sup> Kim, Khi-Woong  
채종길<sup>2</sup> Chai, Jong-Gil  
한병권<sup>3</sup> Han, Byung-Kwon

#### ABSTRACT

The cement paste is mostly used as the filling materials of bored pile in Korea. The use of filling material based on cement paste is inefficient at field construction because it needs a lot of the charging mass. In addition, it has environmental problem according to the large amount of cement use because its strength is also larger than criterion. The excavated soil with stabilizer can be used as the filling materials when the bored pile is constructed. Therefore, this paper describes field application of solidified soil for economical efficiency and environment-friendly. The injection capacity of solidified soil is compared with cement paste's based on unconfined compressive strength test and field load test, and the appropriate of test results is evaluated by design criterion. The evaluation result shows that the capacity of excavated soil with stabilizer is similar to cement paste and the solidified soil is able to apply as filling materials of bored pile because it is satisfied with design criterion.

#### 요지

국내에 시공되고 있는 매입말뚝의 충전재는 주로 시멘트 페이스트를 사용하고 있다. 시멘트 페이스트를 사용한 충전재는 현장 시공 시 실 주입량이 지나치게 커서 비효율적이며, 설계기준에 비해 지나친 강도를 발현하여 시멘트사용에 따른 환경성 문제를 지니고 있다. 이에 대한 대안으로 매입말뚝 시공 시 발생하는 굴착토사를 활용하여 적정 고화제를 혼합한 고화토를 충전함으로써 폐기물 처리비용 절감과 친환경적인 고화토 충전공법의 현장적용성을 검토하였다. 일축압축강도 시험과 현장 재하시험 결과를 토대로 고화토와 기존 시멘트 페이스트 주입재의 성능을 비교하고 설계기준에 적합한지 여부를 검토하였다. 그 결과 고화토 충전재는 시멘트 페이스트 충전재와 유사한 성능을 나타내며 설계기준에도 적합하여 매입말뚝 충전재로서 고화토의 적용성을 확인하였다.

**Keywords :** Bored pile, Solidified soil, Filling materials, Skin friction

#### 1. 서론

매입말뚝에 관한 연구는 주로 비균질 지반 또는 사질토, 화강 풍화토 지반 등에서의 거동을 파악하고 예측하는 방향으로 수행되어 왔다. 말뚝기초의 주면마찰력을 증대시키기 위한 방법으로는 말뚝의 형태를 스크루식, 돌기식으로 제작하는 공법과 팽창막을 이용하여 물리적으로 주면마찰력을 증대시키는 공법이 개발되어 실용화되고 있는

실정이다(Das, 2009).

매입말뚝의 충전용 시멘트 강도에 따른 주면마찰력은 토사혼입률이 커질수록 공극 충전용 재료의 강도가 약해진다고 보고하고 있다(박종배, 1997).

본 연구는 매입말뚝 시공 시 천공으로 발생하는 현장 발생토를 충전재로 재활용하기 위하여 고화처리된 충전재의 강도를 기존 시멘트 페이스트와 비교 검토하여 현장적용성을 확인하고자 하였다.

1\* 정회원, 인천대학교 도시과학대학 도시환경공학부 교수 (Member, Professor, Dept. of Urban Construction Engng, University of Incheon, E-mail: kwkim8722@incheon.ac.kr)

2 비회원, 두산건설(주) 기술연구소 선임연구원 (Non-Member, Manager, Research Institute, Doosan Engineering & Construction)

3 비회원, 이엑스티(주) 기술연구소 소장 (Non-Member, Chief, R&D Center, EXT Co. Ltd.)

매입말뚝 시공 시 말뚝 주변부에 굴착토사와 고화재를 적정 배합하여 충전하였을 때 주변마찰력의 변화에 대하여 시멘트 페이스트를 주입하였을 경우와 비교 분석하였다.

본 연구결과에 따라 매입말뚝 주변부에 충전한 고화토의 주변마찰력이 시멘트 페이스트를 충전하였을 때와 비교하여 동등 이상의 강도가 발현된다면, 매입말뚝 시공 시 굴착토의 폐기물 처리 최소화 공법의 적용이 가능해 짐으로써 폐기물 처리비용이 절감되고 결국 말뚝의 총공사비를 절감할 수 있다.

이로 인해 정부의 저탄소 녹색성장 기본방침에 부응하는 매입말뚝의 현장시공 기술의 개발에 크게 기여하게 될 것이다.

## 2. 고화토의 특성

### 2.1 고화제 성분

고화제는 흙과 혼합하였을 때 수화반응, 이온교환 반응 및 포졸란 반응에 의해 흙을 고결화하는 효과가 발생하게 하는 특성을 가지고 있다(오승환, 2011). 본 연구에 사용한 고화제는 무기염화물계 금속원소와 무기계 알칼리금속인 탄소족, 질소족, 철족 등의 복합물로 구성된 다기능성 고화 재료(BD5000)이다. 수용성으로서 용액으로 살포 또는 혼합수로 사용되므로 토립자 간극사이에 쉽게 침투하여 유기질 토양 주위의 활성막을 표면 화학처리하여 시멘트의 본래 작용 효과를 최대로 발휘시켜 흙 입자 사이에 배열을 안정시키고 그 응결 효과를 크게 해 주는 특성을 가지고 있다. 고화제 BD5000의 성분별 비율은 표 1과 같다.

표 1. 고화제 BD5000의 성분별 구성 비율(이엑스티, 2012)

구분	염화나트륨	염화칼륨	염화마그네슘	기타
함량(%)	16	35	22	27

표 2. 고화토 충전재와 시멘트 페이스트 배합비(1m<sup>3</sup>당)(이엑스티, 2012)

	총중량(kg)	시멘트(kg)	물(kg)	토사(kg)	고화제(kg)	c/w(%)
기존 고화토 충전재	1,449.2	195	487	766	1.2	51
시멘트 페이스트	1,652	955	697	-	-	73

표 3. 충전재 주입량 비교(이엑스티, 2012)

구분	설계량(m <sup>3</sup> )	실 주입량(m <sup>3</sup> )	효율(%)	시멘트(kg)	물(kg)	토사(kg)	고화제(kg)	비고
고화토 충전재	1,482	2.0	74.1	390	974	1,532	2.4	
시멘트페이스트	1,482	6.0	24.7	5,730	4,182	-	-	

## 2.2 기존 고화제 사용 충전재의 배합비

기존 고화제를 사용하여 천공 시 발생토와 시멘트 등을 혼합한 고화토 충전재와 기존 충전용 시멘트 페이스트의 배합비는 표 2와 같다.

충전재 1m<sup>3</sup>당 시멘트 투입량을 보면 기존 고화제를 사용한 충전재의 경우 기존 시멘트 페이스트를 사용한 충전재에 비해 20%(=195/955) 정도로 나타나고 있어 고화토를 사용하였을 때 시멘트를 상당히 절약할 수 있다.

## 2.3 충전재의 주입량

충전재는 주입 시 천공 홀 주변지반의 흙의 간극 사이를 침투하여 천공 홀과 말뚝 사이의 공극의 체적보다 많은 양이 주입되게 된다. 특히 사질토 지반의 경우에는 이러한 현상이 두드러지게 나타난다. 이러한 현상을 확인하기 위하여 현장시험을 실시하였다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

본 시험현장의 경우 표 3에 나타난 바와 같이 고화토 충전재에 비하여 시멘트 페이스트 충전재의 주입량이 현저하게 많이 주입됨을 알 수 있다. 실 투입량에 대한 설계량의 비를 효율로 보면, 시멘트 페이스트 주입량이 6.0m<sup>3</sup>로 고화토 충전재 주입량 2.0m<sup>3</sup>의 3배가 되어 매우 비효율적이다.

또한 표 2에 나타나 있는 것처럼 고화토 충전재를 배합하였을 때 1m<sup>3</sup>당 시멘트량은 시멘트 페이스트를 배합하였을 때 시멘트량의 약 20% 정도다. 더구나 표 3에서처럼 실 주입량 기준으로 보면 고화토 충전재를 주입하였을 때 1m<sup>3</sup>당 시멘트량은 시멘트 페이스트를 주입하였을 때 시멘트량의 약 7%(=390/5,730) 밖에 되지 않는다.

따라서 매입말뚝 충전재로서 기존에 사용하던 시멘트 페이스트 대신 고화토를 충전재로 사용하는 것은 적절한

대안이라 할 수 있다.

### 3. 고화토의 일축압축강도

#### 3.1 기존 고화토의 일축압축강도

표 2와 같은 배합비로 제작한 공시체의 일축압축시험 결과가 그림 1에 나타나 있다.

기존 고화토 충전재의 재령 28일 일축압축강도는 국내의 매입말뚝 시공 시 주변 고정액의 표준 일축압축강도 기준인 0.5MPa(한국도로공사, 2004) 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

#### 3.2 고강도용 충전재의 일축압축강도

그림 1과 같이 시멘트 페이스트의 일축압축강도는 설계

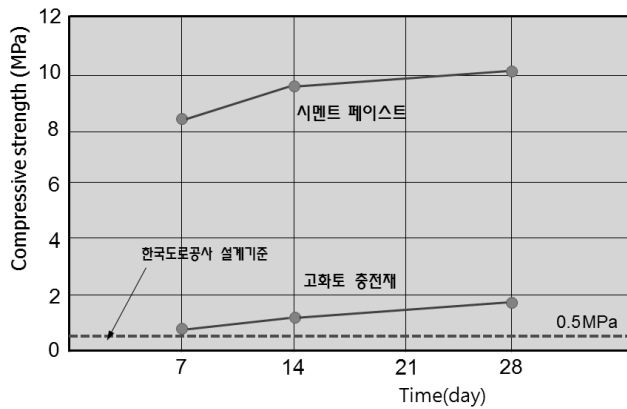


그림 1. 기존 고화토와 시멘트 페이스트 충전재의 비교(이엑스티, 2012)

기준의 9~10배 정도로 지나치게 큰 강도가 발현되고 있다고 할 수 있다. 기존 고화제를 사용한 고화토 충전재의 강도는 설계기준을 만족하나 시멘트 페이스트의 강도에 비해 현저히 작은 점을 보완하기 위하여 새로운 고강도용 충전재를 개발하였다. 2개 지역 현장의 토사를 사용하여 최적 배합비를 선정하기 위한 고화토 유형을 표 3에 나타내었다.

현장 1은 부산지역, 현장 2는 인천지역의 점토질 실트로서 고화제 유형 및 물과 시멘트량에 따른 고화토 유형을 12가지로 구분하여 배합하여 제작한 공시체의 일축압축강도는 표 4와 같다.

표 4에서 보는 바와 같이 공시체의 일축압축시험 결과는 현장 1의 경우 'Type 13' 고화토의 재령 28일 강도가 가장 높게 나타나고 있다. 현장 2의 경우도 'Type 23' 고화토의 재령 28일 강도가 가장 높게 나타나고 있다. 매입

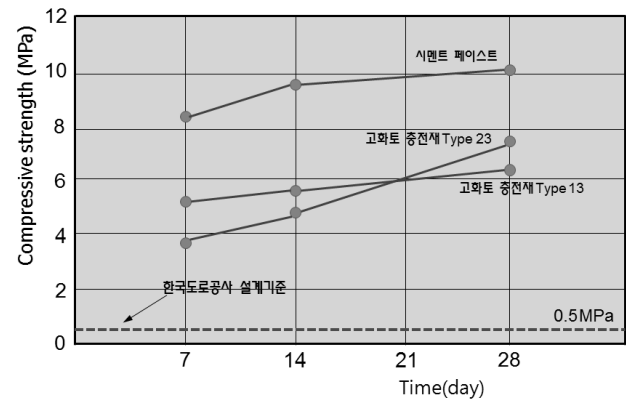


그림 2. 고강도용 고화토와 시멘트 페이스트 충전재의 일축압축강도 (이엑스티, 2012)

표 4. 현장 발생토를 이용한 고화토 배합시험(이엑스티, 2012)

고화토 유형	토사(kg)	고화제(kg)		시멘트(kg)	물(kg)	$\sigma_{ck}$ (MPa)	비 고		
		중량	구분				고성능감수제	Flow(mm)	
현장 1	Type 11	1700	1	실트질 점토용	200	800	2.69	0.3%	190
	Type 12	1700	1		300	800	2.84	0.3%	195
	Type 13	1700	1		400	800	6.14	0.3%	195
	Type 14	1700	1	실트질 모래용	200	737.6	2.53	0.3%	190
	Type 15	1700	1		300	800	4.06	0.3%	190
	Type 16	1700	1		400	840	5.67	0.3%	198
현장 2	Type 21	1700	1	실트질 점토용	200	396.8	2.19	0.3%	190
	Type 22	1700	1		300	384	4.86	0.3%	195
	Type 23	1700	1		400	416	6.68	0.3%	195
	Type 24	1700	1	실트질 모래용	200	360	2.62	0.3%	190
	Type 25	1700	1		300	384	4.70	0.3%	190
	Type 26	1700	1		400	416	6.45	0.3%	198

표 5. 고강도 충전재용 고화토의 배합비(이엑스티, 2012)

기준 : 1m<sup>3</sup>당

Type	총중량(kg)	시멘트(kg)	물(kg)	토사(kg)	고화제(kg)	고성능 감수제	Flow(mm)
Type 13	1,652,625	250	500	1,062	0,625	0,3%	195
Type 23	1,572,625	250	260	1,062	0,625	0,3%	195

표 6. 현장 지층 구조(이엑스티, 2012)

공 번	지층명	심 도(G.L-m)		층후 (m)	구 성 상 태	N-Value
		G.L- (m)	E.L+ (m)			
NH-30	풍화토	0.0~32.1	91.0~58.9	32.1	실트질 점토, 암편, 핵석	24/30~50/8
	풍화암	32.1~33.2	58.9~57.8	1.1	실트질 점토, 암편	50/3
	연암층	33.2~43.2	57.8~47.8	10.0	암편상 및 장주상	-



표 7. 재하시험의 종류와 내용(이엑스티, 2012)

구분	NO.	제원	심도(m)	충전재	시험 내용
case-1	PLT-1	PHC	9.5	시멘트페이스트	정/하중전이
case-2	PLT-2	D450	9.5	고화토	정/하중전이
case-3	LLT-1	PHC	9.0	시멘트페이스트	수평재하
case-4	LLT-2	D450	9.0	고화토	수평재하
case-5	PDA-1	PHC	9.0	시멘트페이스트	동재하
case-6	PDA-2	D450	8.0	고화토	동재하

말뚝 충전용 고화토의 시멘트 투입량을 토사 1,700kg 당 400kg을 사용한 고강도용 충전재와 한국도로공사 설계기준을 비교하여 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 보는 바와 같이 새로 개발한 고화토의 일축압축강도는 기존에 사용하던 시멘트 페이스트에 비해 다소 작으나 한국도로공사 설계기준에 비하여 월등히 커서 충전재용 고화토로서 충분한 성능을 발휘하는 것으로 확인되었다.

표 4와 같이 충전재의 일축압축강도는 시멘트량이 많을수록 크게 나타난다. 그러나 시멘트량을 줄이고자 하는 친환경적 고화토 충전재의 목적으로 볼 때 이미 충분한 강도를 확보하였으므로 강도증가를 위해 시멘트량을 더 이상 증가시키는 것은 바람직하지 않을 것이다.

현장에 적용한 고강도용 충전재의 단위 체적당 배합비를 표 5에 나타내었다.

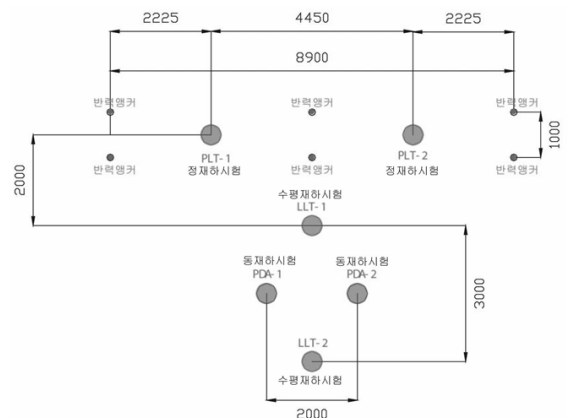


그림 3. 현장 재하시험 배치도

## 4. 현장 재하 시험

### 4.1 시험 개요

새로 개발한 고화토의 강도특성을 파악하고 기존 시멘

트 페이스트를 사용한 충전재와 비교하기 위하여 경기도 00현장에서 현장재하시험을 수행하였다. 현장 지반의 지층구조에 관한 내용을 표 6, 재하시험용 매입말뚝 재하시험의 종류와 내용을 그림 3과 표 7에 나타내었다.

#### 4.2 동재하시험

매입말뚝 충전재의 양생 후에 수행한 동재하시험 결과 중 항타관입성 분석을 실시한 결과 재항타 동재하시험 시 최대압축응력이 0.333~0.421ton/m<sup>2</sup>로 PHC말뚝의 허용 항타 응력 0.480ton/m<sup>2</sup> 이내로 측정이 되어 항타에 의한 재료의 응력은 모두 허용응력 이내인 것으로 나타났다. 또한 항타 시 측정된 항타 에너지도 5.2~6.7ton·m(효율 74.3~95.7%) 정도로 양호하게 나타났다.

#### 4.3 주면 마찰력

00현장에서 수행한 시험말뚝 4개소에 대하여 매입말뚝

시공후 드롭 해머 4.0ton(시항타), 유압 해머 7.0ton(재항타)으로 시항타 및 재항타시 측정된 결과에 대하여 capwap 분석하였다(이엑스티, 2012).

매입말뚝의 충전재로서 현장 발생토를 이용한 고화토의 성능평가를 위해 실시한 동재하시험 결과 중 충전재가 양생된 후 수행한 재항타 시험 결과를 현장 발생토를 이용한 고화토와 일반 시멘트페이스트의 성능을 비교하여 표 9에 나타내었다.

표 9와 같이 주면 마찰력의 분포와 평균 단위 마찰력의 크기를 비교한 결과 현장 발생토를 이용한 고화토로 충전한 말뚝의 평균단위 마찰력은 8.35ton/m<sup>2</sup>로 시멘트페이스트로 충전한 말뚝의 평균단위 마찰력 7.94ton/m<sup>2</sup>보다 약간 크게 나타났다.

#### 4.4 정재하시험

본 시험말뚝 정재하시험 결과를 침하량 분석 및 극한하

표 8. 동재하시험 결과(이엑스티, 2012)

구분	재원	사용해머	최종관입량 (mm)	최대압축응력 (ton/cm <sup>2</sup> )	최대인장응력 (ton/cm <sup>2</sup> )	항타 에너지(ton·m) / 효율(%)
PDA-1	PHC D450	Drop 4.0	2.0	0.283	0.010	3.1 / 39
PDA-2			4.0	0.203	0.015	3.2 / 40
PDA-1		DKH 7.0	-	0.421	0.015	6.7 / 95.7
PDA-2			-	0.333	0.011	5.2 / 74.3

표 9. 동재하시험에 의한 주면 마찰력(이엑스티, 2012)

	고화토(A)	시멘트페이스트(B)	비교(A/B)
주면 마찰력	63.5ton	71.0ton	0.89
평균 단위 마찰력	7.94ton/m <sup>2</sup>	8.35ton/m <sup>2</sup>	0.95

표 10. 종합 지지력 판단결과(이엑스티, 2012)

구분	기준	적용하중(ton)	안전율	허용지지력(ton)
침하량 분석	25.4mm	163.5	2.0	81.7
극한하중 분석	45.0mm	208.8	3.0	69.6
항복하중 분석	P-S Curve	150.0	2.0	75.0
최종 허용지지력(ton)				69.6

표 11. 하중전이 분석 결과(이엑스티, 2012)

구분	심도(m)	최대 단위 마찰력(ton/m <sup>2</sup> )		비교 (A/B)
		고화토(A)	시멘트페이스트(B)	
1	1.0 - 2.5	6.1	6.6	0.92
2	2.5 - 4.0	6.0	8.1	0.74
3	4.0 - 6.0	7.1	10.3	0.72
4	6.0 - 8.5	7.4	17.0	0.42
평균		6.65	10.5	0.73

표 12. 수평저항력 비교(이엑스티, 2012)

구분	기준	고화토(A)	시멘트페이스트(B)	비고(A/B)
허용 수평력(ton)	15.0mm	5.3	5.01	1.06
지반반력계수(kg/cm <sup>3</sup> )	Chang's Method	0,173	0,162	1.07

중, 항복하중 분석결과를 종합하여 구한 최종 허용지력  
은 표 10과 같다.

하중전이 분석을 통해 얻은 결과는 표 11과 같이 고화  
토의 최대 단위마찰력은 시멘트 페이스트에 비해 평균 73%  
정도인 것을 나타냈다.

#### 4.5 수평저항력

현장 발생토를 이용한 고화토를 충전한 매입말뚝과 일  
반 시멘트페이스트를 충전한 매입말뚝의 수평재하시험 결  
과 수평 저항력은 표 12와 같이 거의 유사하게 나타났다.  
이는 충전재의 성능보다 상부 지반의 수평 저항 성능이 작  
아 충전재의 성능이 항복에 이르기 전에 지반의 수평 저항  
성능이 먼저 항복하여 발생한 결과로 사료된다.

### 5. 결 론

기존 고화제를 사용한 고화토의 일축압축강도는 설계  
기준을 만족하나 시멘트 페이스트에 비해 현저히 낮은 점  
을 고려하여 새로운 고화토를 개발하였다.

새로 개발한 고화토를 충전한 매입말뚝과 일반 시멘트페이  
스트를 충전한 매입말뚝의 강도특성을 일축압축시험 및 현장  
재하시험을 통해 비교분석하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 적정 배합비를 적용한 고화토 충전재의 일축압축강도  
는 시멘트 페이스트 충전재보다는 작으나 설계기준을  
충분히 만족한다.
- (2) 현장 동재하시험 결과 최대 압축응력은 PHC말뚝의  
허용응력 이내로 나타났다. 또한 주면마찰력은 적정  
배합비를 적용한 고화토 충전재가 시멘트 페이스트  
충전재보다 약간 크게 나타났다.
- (3) 현장 정재하시험에 의한 하중전이 분석 결과 적정 배

합비를 적용한 고화토 충전재의 최대 단위마찰력은  
시멘트 페이스트 충전재의 73% 정도로 나타났다.

- (4) 현장 수평저항력시험에 의한 말뚝의 수평저항력은 적  
정 배합비를 적용한 고화토 충전재와 시멘트 페이스  
트 충전재가 유사하게 나타났다.

이와 같은 결과를 종합하여 볼 때 적정 배합비를 적용한  
고화토 충전재는 시멘트 페이스트 충전재와 유사한 성능  
을 발휘하며, 현장 매입말뚝의 충전재로서 충분한 성능을  
갖는 것으로 평가할 수 있다.

고화토 충전재는 시멘트 사용량 및 충전재의 실 주입량  
을 고려하면 시멘트 페이스트 충전재보다 환경성과 경제  
적으로 우수하다고 평가된다.

### 감사의 글

이 논문은 인천대학교 2011년도 자체연구비 지원에 의  
하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 박종배 (1997), “매입말뚝의 시멘트풀 강도 및 마찰저동에  
관한 연구”, *한국지반환경공학회논문집*, 제5권, 제3호,  
pp.31-39.
2. 오승환 (2011), *고화토와 회전식 굴삭기를 이용한 천층고  
화처리공법의 현장적용성 평가*, 석사학위논문 인천대학교.
3. 이엑스티 (2012), *매입말뚝 천공 시 발생하는 굴착토의 현  
장 재활용 및 폐기물 최소화 기술의 실용화 현장 적용성  
시험 최종보고서*.
4. 한국도로공사 (2004), *SIP공법의 시공 및 설계지침*, 한국  
도로공사 설계처.
5. Das B. M. (2009), *Principle of Foundation Engineering*, 6th  
edition, Thomson.

(논문접수일 2012. 8. 23, 심사완료일 2012. 9. 16)