

매입말뚝 시공시 현장토를 활용한 고화처리 충전재의 현장 적용성 평가

Applicability of Solidified Soil as a Filling Materials in the Drilling of the Bored-precast Pile

김기웅¹, 박정준^{2*}, 한병권³

Khi-Woong Kim¹, Jeong-Jun Park^{2*}, Byung-Kwon Han³

¹Member, Professor, Dept. of Urban Construction Engng, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, Republic of Korea

²Member, Head Manager, Research Institute, GK Engineering, 91, LS-ro, Dongan-gu, Anyang City, Kyunggi Province, Republic of Korea

³Non-Member, Chief, R&D Center, EXT Co. Ltd., 91, Gasan digital-ro, Kumcheon-gu, Seoul, Republic of Korea

ABSTRACT

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 static axial load tests and the load-transfer measurements were performed to examine the axial resistant behavior of the piles. As results, the flowability, segregation and bleeding, and bond strength of filling materials was a good performance than that of the existing cement paste. But the skin friction of pile by PDA was slightly decreased than that of the existing cement paste. However, as pile filling materials, and in terms of economics and environment, the applicability of filling material is considered very effective.

요 지

시멘트 페이스트를 사용한 충전재는 현장 시공 시 실제 주입량이 지나치게 커서 비효율적이며, 설계기준에 비해 과도한 강도를 발현하여 시멘트 사용에 따른 환경성 문제를 지니고 있다. 이에 대한 대안으로 기존의 시멘트 페이스트를 대체함과 동시에 경제성과 환경성을 고려하여 현장에서 발생하는 현장토를 충전재로 재활용한 고화처리 충전재의 현장 적용성을 평가하였다. 또한, 현장 재하시험 및 하중전이 계측을 수행하여 말뚝의 축방향 지지거동을 분석하였다. 그 결과 고화처리 충전재는 기존 시멘트 페이스트에 비해 유동성과 재료분리저항성 및 부착강도에서는 좋은 성능을 발휘하였고, 동재하시험에 의한 주면마찰력은 다소 떨어졌으나 수평지지력 및 인발력 등은 유사하였고, 설계지지력 이상 도출되어 기준에 부합된 결과를 나타내었다.

Keywords : Bored pile, Solidified soil, Filling materials, Skin friction, Load transfer

1. 서론

최근 건설 현장에서는 말뚝기초 공사 시 소음과 진동 규제 강화 추세에 따라 매입공법에 의한 말뚝 공사가 증가하고 있다. 매입말뚝에 관한 연구는 주로 비균질 지반 또

는 사질토, 화강 풍화토 지반 등에서의 거동을 파악하고 예측하는 방향으로 수행되어 왔다. 말뚝기초의 주면마찰력을 증대시키기 위한 방법으로는 말뚝의 형태를 스크류식, 돌기식으로 제작하는 공법과 팽창막을 이용하여 물리적으로 주면마찰력을 증대시키는 공법이 개발되어 실용화되고 있다(Das, 2009). 그러나 매입 공법은 필연적으로 굴착토가 발생되어 폐토사 반출을 위한 공사비가 발생하며, 말뚝 주면에는 시멘트 페이스트 주입에 따른 비용이 추가

Received 12 May. 2014, Revised 5 Jun. 2014, Accepted 7 Jun. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-2-813-5345; Fax: +82-2-816-4160

E-mail address: smearjun@hanmail.net (J. J. Park)

된다. 특히, 폐토사는 해양 매립토 등으로 일부 처리되고 있지만 환경적인 문제를 야기할 수 있기 때문에 굴착토의 재활용이 요구되어지고 있다.

매입말뚝의 충전용 시멘트 강도에 따른 주변마찰력은 토사혼입률이 커질수록 공극 충전용 재료의 강도가 저하됨을 제시하고 있다(Park, 2004). 천공 내부와 말뚝사이에 주입되는 충전재의 역할은 하중 재하 초기단계에서의 말뚝 자립과 주변 마찰력의 기능을 기본으로 하며, 말뚝 주변 흙이 지니고 있는 역학적 특성 이상의 성능에서는 말뚝 주변채움재로서의 기능이 상대적으로 저하되어 장기적인 효과가 감소된다(Choi et al., 2011). 따라서 역학적으로 큰 의미가 없는 말뚝 주변 채움재 부분에 환경 부하를 유발시키는 시멘트 페이스트를 주입하는 것은 경제성 및 환경성이 떨어져 현장에서 발생하는 굴착토에 친환경 고화재를 사용하여 현장토 활용 충전재로 대체하는 기술이 제시되고 있다. 최근의 연구에서 현장 발생토를 활용한 기술이 개발되고 있으나, 매입말뚝 주변 충전재로써 활용하기 위한 소요 강도를 만족하지 못하기 때문에 대부분 지중 매설관 또는 노면하부 공동부의 뒷채움재로써 그 활용이 한정되고 있다(Kim et al., 2003; Park et al., 2004).

따라서, 본 논문에서는 매입말뚝 시공 시 발생하는 현장 발생토를 충전재로 재활용하기 위하여 현장토를 활용한 고화처리 충전재의 역학적 특성을 도출하여 기존 사용되고 있는 시멘트 페이스트와 비교하여 현장 적용성을 평가하였다. 또한, 현장에서 굴착토사와 고화재를 적정 배합한 고화처리 충전재를 사용하여 시공된 매입말뚝에 대한 재하시험 및 하중전이 계측을 수행하여 말뚝의 축방향 지지 거동을 분석 하였고, 현장조건과 동일한 스케일을 대상으로 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D를 이용하여 충전재에 따른 하중전이 특성을 평가하였다.

2. 고화처리 충전재의 배합설계 및 실내 실험

2.1 고화재 성분

고화재는 흙과 혼합하였을 때 수화반응, 이온교환 반응

및 포졸란 반응에 의해 흙을 고결화하는 특성을 가지고 있다(Oh, 2011). 본 연구에서 사용한 고화재는 무기염화물계 금속원소와 무기계 알칼리금속인 탄소족, 질소족, 철족 등의 복합물로 구성된 다기능성 고화재료이다. 수용성으로서 용액으로 살포 또는 혼합수로 사용되므로 토립자 간극사이에 쉽게 침투하여 유기질 흙 주위의 활성막을 표면 화학처리하여 시멘트의 본래 작용 효과를 최대한 발휘시켜 흙 입자 사이에 배열을 안정시키고 응결 효과를 크게 해 주는 특성을 가지고 있다.

2.2 배합설계

천공 시 발생한 현장토와 시멘트 등을 혼합한 고화처리 충전재와 기존 사용되고 있는 시멘트 페이스트에 대한 배합표는 Table 1과 같으며, 시멘트 페이스트의 배합비는 Korea Land & Housing Corporation의 ‘전문시방서 30535’ (2010)에 준하여 배합비를 결정하였다. 사용된 현장발생토는 4.95mm체를 이용하여 분리한 다음 통과한 자연상태의 시료를 사용하였다. 충전재 1m³당 시멘트 투입량은 고화처리 충전재의 경우 기존 시멘트 페이스트를 사용한 충전재에 비해 20% 정도로 나타나고 있어 고화처리를 하였을 때 시멘트를 상당히 절약할 수 있음을 나타내었다.

2.3 실험방법 및 결과

2.3.1 실험방법

고화처리 충전재의 기본적인 역학적 특성과 성능을 확인하기 위하여 ASTM D6103(2004)에 준하여 직경 80mm, 높이 80mm인 원형 실린더로 유동성을 평가하였으며, 재료분리 저항성은 ASTM C940(2003)에 준하여 실시하였다. 또한, 압축강도는 KSF 2405(2010)에 준하여 수행하였으며, 고화처리 충전재 및 시멘트 모르타르 각각 공시체 3개씩 총 18개를 제작하였다.

부착강도 시험체는 Fig. 1과 같이 PHC 파일의 일부를 절단한 후 그 시편 위에 50mm×50mm×50mm 몰드를 제작하여 올리고 고화처리 충전재와 시멘트 페이스트를 타

Table 1. Mixing ratio of solidified-filling material and existing cement paste (1m³) (EXT, 2012)

	Total weight (kg)	Cement (kg)	Water (kg)	Soil (kg)	Stabilizer (kg)	W/C (%)
Solidified-filling material	1,449.2	195	487	766	1.2	51
Cement paste	1,652	955	697	-	-	73

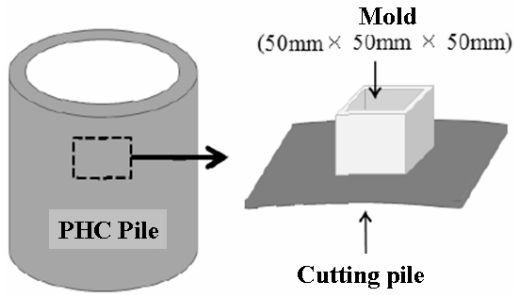
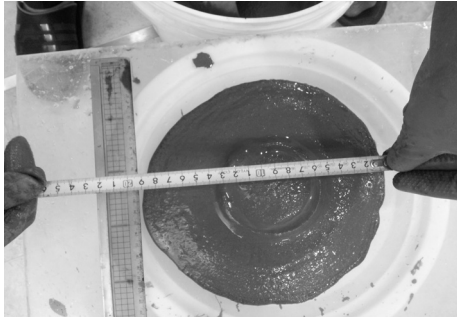
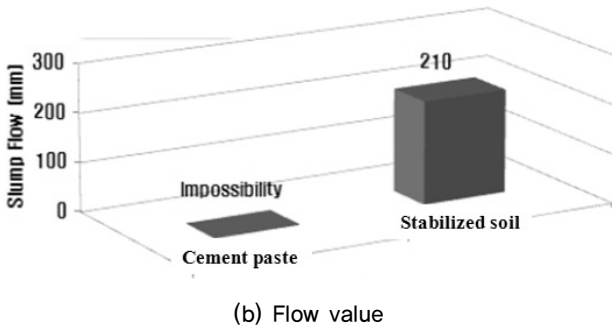


Fig. 1. Bond strength test specimen



(a) Measuring of flowability



(b) Flow value

Fig. 2. Results of Flow test

설하였으며, 시험체는 각각 3개씩 총 6개를 제작하였다. 압축강도와 부착강도는 시험체를 제작한 후 현장 대기상태에서 양생한 후 측정하였다.

2.3.2 유동성

유동성을 확인하기 위하여 Fig. 2와 같이 직경 80mm, 높이 80mm의 아크릴 원통을 이용하였으며, 일반적으로 다짐없이 잘 채워지기 위해서는 플로우가 실린더 직경의 2배 이상을 만족하여야 한다. 유동성 평가 결과, 고화처리 충전재의 플로우 값은 210mm로서 실린더 직경 80mm의 2.6배를 만족하였다. 시멘트 페이스트의 경우 높은 물-시멘트비로 인해 플로우값 측정이 불가능하였다.

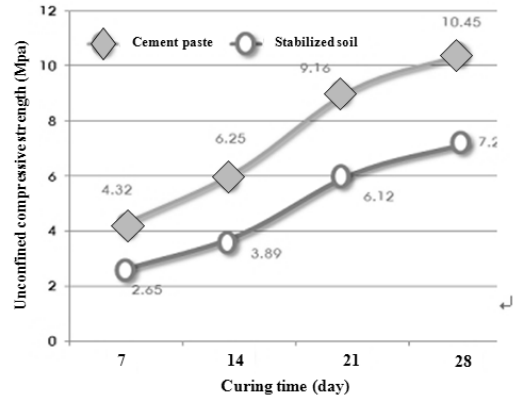


Fig. 3. Unconfined compressive strength with curing time

2.3.3 일축압축강도

현장에서 배합된 시료를 50×50mm 큐빅 몰드로 제작하여 습윤 양생하여 3일, 7일, 14일, 28일 순으로 일축압축강도 시험을 실시하였다. Fig. 3은 일축압축강도 시험 결과이며, 고화처리 충전재의 28일 일축압축강도는 평균 7.2MPa로 기존 시멘트 페이스트의 일축압축강도의 69.2%의 강도를 나타내었다. 그러나 국내 매입말뚝 주변 충전재의 일축압축강도 기준인 0.5MPa보다 10배 이상의 강도를 발현하였다. 즉 고화처리 충전재의 일축압축강도는 기존에 사용하던 시멘트 페이스트에 비해 다소 작으나 한국도로공사 설계기준에 비하여 월등히 커서 충전재용 고화토로서 충분한 성능을 발휘하는 것으로 확인되었다.

고화처리 충전재의 일축압축강도는 시멘트량이 많을수록 크게 나타났으나, 시멘트량을 줄이고자 하는 친환경적 충전재의 목적으로 볼 때 이미 충분한 강도를 확보하였으므로 강도증가를 위해 시멘트량을 증가시키는 것은 비경제적이다. 즉, 고화처리 충전재는 일정 강도를 발현하여 말뚝의 주변마찰력에 영향을 미칠 수 있지만, 소요강도 이상에서는 채움재가 주변 지반의 강도 이상이기 때문에 충전재와 주변지반 사이의 마찰력 향상에는 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

2.3.4 부착강도

부착시험은 만능시험장치(50ton)를 사용하여 0.2mm/min로 일정하게 변위제어 하였으며, 시험체의 채령일은 14일 기준으로 실시하였다. Fig. 4는 시험체 3개의 평균 부착강도 결과를 나타낸 것으로서, 압축강도시험에서 강도발현이 작았던 고화처리 충전재 시험체의 부착강도가 기존의 시멘트 페이스트 시험체 보다 25%정도 높게 발현되었다.

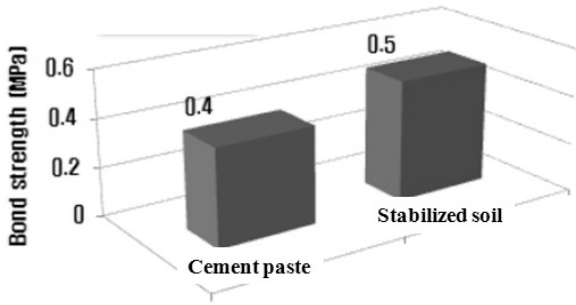


Fig. 4. Result of bond strength test

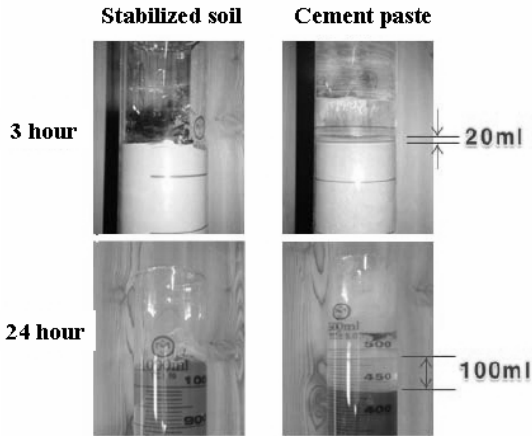


Fig. 5. Segregation resistance test

2.3.5 재료분리저항성

고화처리 충전재와 시멘트 페이스트 두 시험체에 대하여 타설 3시간 후와 타설 24시간 후의 재료분리저항성을 측정하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 타설 3시간 후 시멘트 페이스트에서는 20ml의 블리딩이 발생하였으며, 타설 24시간 후에는 100ml의 블리딩이 발생하였으나, 고화처리 충전재 시험체는 블리딩이 전혀 발생하지 않았다. 시멘트페이스트는 시멘트 대비 다량의 물이 사용되어 시멘트와 반응하지 않은 잉여수가 발생된 것이며, 지중에서 이러한 블리딩이 다량 발생되어 지반으로 다량의 수분이 흡수된다면, 지반의 강도를 저하시키는 원인으로 작용할 수

Table 2. Type of load test

Section	NO.	Pile size	Depth (m)	Filling material	Test type
case-1	PLT-1	PHC	9.5	Cement paste	Static/Load transfer
case-2	PLT-2	D450	9.5	Stabilized soil	Static/Load transfer
case-3	LLT-1	PHC	9.0	Cement paste	Lateral load
case-4	LLT-2	D450	9.0	Stabilized soil	Lateral load
case-5	PDA-1	PHC	9.0	Cement paste	Dynamic load
case-6	PDA-2	D450	8.0	Stabilized soil	Dynamic load

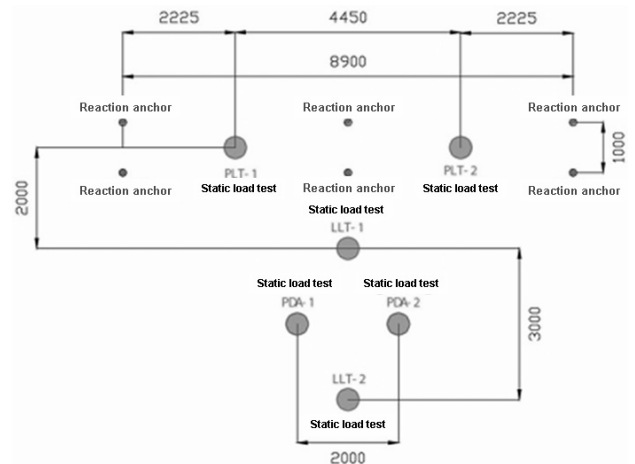


Fig. 6. Plan of field load test

있을 것으로 판단된다.

3. 현장 재하 시험

3.1 시험 개요

본 연구에서는 매입말뚝의 충전재로서의 성능을 평가하기 위하여, 군포 OO아파트 공사 현장에서 현장 적용성 시험을 실시하였으며, 기존 시멘트 페이스트를 채움재로 활용하는 말뚝과 고화처리 충전재를 적용한 말뚝에 대해 지지력 특성을 분석하기 위하여 일축 압축강도시험 및 현장재하시험, 하중전이 특성 등을 실시하였다(Kim et al., 2012). Fig. 6은 재하시험용 매입말뚝의 시험 위치, Table 2는 시험말뚝제원 및 시험 항목을 나타낸 것이다.

3.2 동재하시험

동재하 시험은 Fig. 7과 같이 시험 말뚝 2개소에 대하여 센서를 말뚝에 부착시키고, 말뚝을 천공홀에 삽입하여 시멘트 페이스트와 고화처리 충전재를 각각 천공홀에 부어넣은

후 측정장치와 연결시켰다. 그 후 Drop Hammer 4.0 ton(시항타), 유압 Hammer 7.0ton(재항타)으로 시험하였으며, 측정된 결과를 CAPWAP 방법에 의하여 분석하였다. CAPWAP 방법은 CASE 방법과 마찬가지로 말뚝두부에서 측정된 힘과 시간, 또는 가속도와 시간과의 관계를 이용하여 지지력을 예측하는 방법이나, 근본적으로 CASE 방법에서처럼 약산 공식을 이용하지 않고 프로그램을 이용하여 구하는 방법이다. 즉, 항타분석기로부터 얻어진 힘과 속도를 이용, 말뚝에 작용하는 힘과 말뚝의 변위를 정량화하여 시행착오법에 의한 Signal Matching 과정을 통해 말뚝의 지지력, 지반저항력의 분포, Quake 및 Damping 특성 등을 결정하는 방법이다.

분석 결과, 주면 마찰력의 분포와 평균 단위 마찰력의 크기를 비교 하면 Table 3과 같으며, 현장 발생토를 이용한 고화처리 충전재 말뚝의 평균단위 마찰력은 8.4ton/m²로 시멘트 페이스트로 충전한 말뚝의 평균단위 마찰력 7.9ton/m²보다 약간 크게 나타나, 기존 시멘트 페이스트와

거의 유사한 성능을 발휘하였다. 그리고, 경험식에 의한 설계극한주면마찰력 대비하여 모두 설계 지지력 이상임으로 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

매입말뚝 충전재의 양생 후에 수행한 동재하시험 결과 중항타관입성 분석에서 재항타 동재하시험 시 최대압축응력이 0.3~0.4ton/m²로 PHC말뚝의 허용 항타 응력 0.5ton/m² 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.

3.3 정재하시험을 통한 하중전이

현재 정재하시험은 말뚝의 지지력을 정하는 가장 정확한 방법으로 알려져 있으며(FHWA, 1998), 거의 모든 설계기준에서 이 시험을 통해 말뚝기초의 지지력을 확인하도록 제안하고 있다. 그러나 대부분의 재하시험은 설계지지력을 확인하기 위한 시험으로 극한지지력을 평가한 시험자료는 구하기가 매우 어렵고, 말뚝의 지지력 발현을 분석할 수 있는 하중전이시험은 매우 드물게 실시하고 있는 실정이다.

하중전이시험을 위해서 말뚝 제작 전에 철근망 등에 스트레인게이지를 부착하여 별도로 하중전이시험용 말뚝을 제작하였고, 하중 재하시 말뚝의 주면지반으로 전이되는 하중을 측정하여, 심도별 주면 마찰력을 측정하였다. 정재하 시험의 수행방법은 지중 앵커를 이용한 앵커 반력 재하 방식으로 하였다. 하중전이시험 측정 결과는 Table 4와 같으며, 기존 시멘트 페이스트와 대비하여 심도별 주면 마찰력은 평균 73%정도의 저항특성을 나타내며, 설계 지지력 이상의 성능을 발휘하였다.

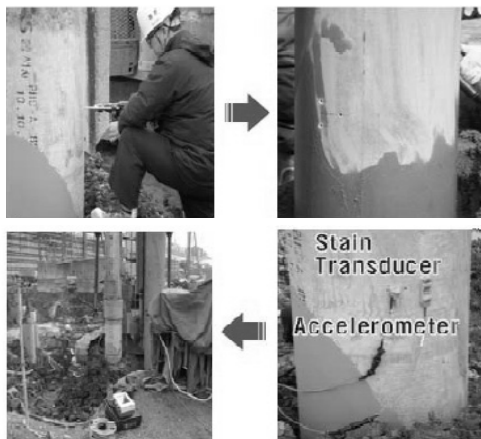


Fig. 7. Process of dynamic load test

Table 3. Result of dynamic load test

Section	Filling material	Ultimate skin friction (A) (ton)	Average unit friction (B) (ton/m ²)	Designed bearing capacity (empirical formula) (C) (ton)	Remark (A/C)
PDA-1	Cement paste	71.0	8.4	35.0	202%
PDA-2	Stabilized soil	63.5	7.9	33.5	189%

Table 4. Analysis of load transfer

No.	Depth (m)	PLT-1 (Cement paste, A)	PLT-2 (Stabilized soil, B)	Designed bearing capacity (empirical formula)	Performance comparison (B/A)
		Max. unit friction force (ton/m ²)			
1	1.0 ~ 2.5	6.6	6.1	1.0 ~ 2.6	92 %
2	2.5 ~ 4.0	8.1	6.0	1.0 ~ 2.0	74 %
3	4.0 ~ 6.0	10.3	7.1	2.8 ~ 3.6	72 %
Average		8.3	6.4	2.2	77 %

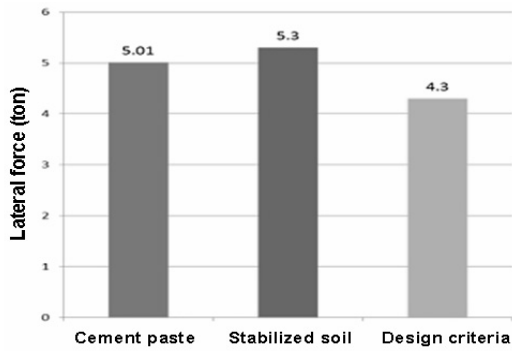


Fig. 8. Result of lateral load test

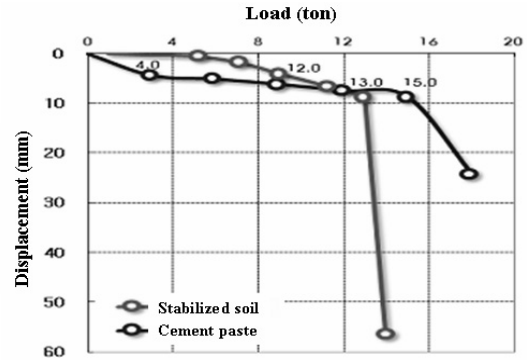
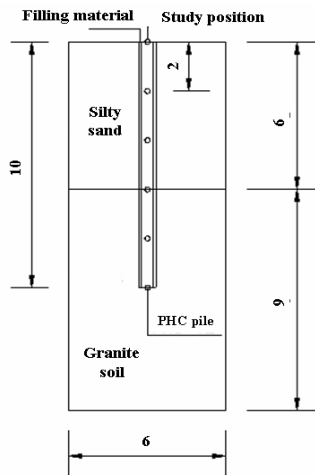
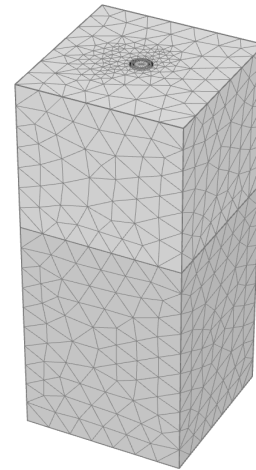


Fig. 9. Result of field pullout test



(a) Cross section



(b) Mesh

Fig. 10. Cross section and mesh of numerical analysis

3.4 수평재하시험 및 현장인발시험

수평재하시험은 2:1 반력 이용재하방식으로 이용하였으며, 하중은 표준재하 방식을 준용하였으며, 총 10단계로 나누어 15.0mm 초과시까지 재하를 실시하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 고화처리 충전재의 경우, 기존 시멘트 페이스트와 거의 동등한 성능을 보였으며, 이는 시멘트 페이스트보다 입자가 크기 때문에 지하수에 유실이 적어 상부구간이 밀실하게 채워져 수평 저항 성능이 뛰어난 것으로 판단된다.

인발시험은 말뚝기초 설계시 풍하중 또는 인발하중에 저항하는 기초말뚝의 인발저항력 산정을 위해서도 필수적이지만, 압축재하시험 결과의 보완을 위해서 즉, 주면마찰력의 규명을 위해서도 효과적이다. 부착강도 성능을 평가하기 위하여 PVC 원형통(직경 : 650mm, 높이 : 650mm.)에 PHC 파일(직경 : 450mm, 높이 1,000mm)을 삽입 후 주면에 시멘트 페이스트와 현장 발생토를 이용한 고화처리 후 인발 시험을 실시하였다. 인발 시험 결과는 Fig. 9와

같으며, 단위저항력으로 환산한 결과는 시멘트 페이스트는 11.2ton/m²으로 측정되었고, 고화처리 충전재의 경우는 9.7 ton/m²으로 87% 정도의 성능을 발휘하였다.

4. 수치해석

4.1 수치해석 모델링

본 연구의 수치해석에 사용된 Plaxis 3D은 3차원 지반공학 전용 유한요소해석 프로그램으로 탄소성 상태에서 평형상태에 도달 및 수렴을 위한 효율적 알고리즘이 적용되며, 인터페이스 마찰각과 점착력만을 입력하도록 하여 인터페이스 요소를 이용하면 지반과 벽체의 슬립현상을 재현하여 실제 흙-구조물 거동을 쉽게 나타낼 수 있다.

유한요소해석에 적용된 말뚝의 규모는 Fig. 10과 같으며, 말뚝직경은 450mm, 말뚝길이가 10m인 PHC 파일에 2m 간격으로 응력과 변위 거동을 파악할 수 있도록 위치를

Table 5. Properties of model

Type	Model	Unit weight, γ_t (kN/m ³)	Cohesion, c (kPa)	Friction angle, ϕ (°)	Elastic modulus, E (MPa)	Poisson's ratio, ν	
Soil	Silty sand	Mohr-coulomb	18.0	0	25	30	0.35
	Granite soil	Mohr-coulomb	19.0	27.7	27	50	0.33
Pile	Linear elastic	24.5	–	–	3.92×10^4	0.25	
Cement paste	Elastic	20.0	–	–	1,312.5	0.28	
Stabilized filling	Mohr-coulomb	19.0	4,000	–	1,200	0.33	

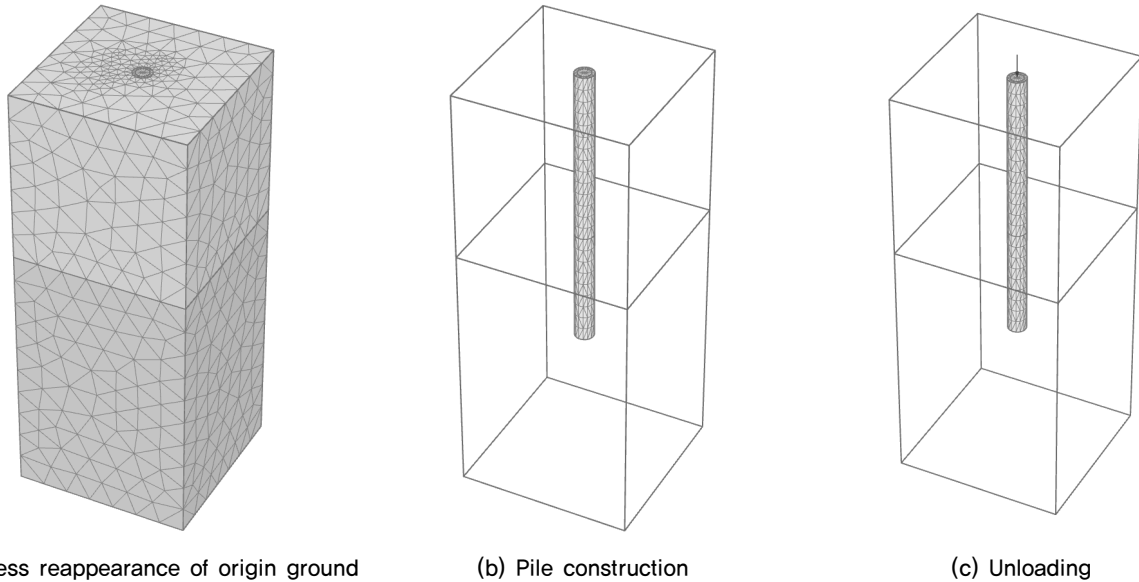


Fig. 11. Analysis modeling as construction step

선정하였고, 해석에 사용된 격자요소망(mesh)은 Fig. 10(b)와 같다. 즉, 변위의 경계조건으로 X축 직교평면(좌, 우측면)은 X방향 변위 고정, Y축 직교평면(전, 후면)은 Y방향 변위 고정, 바닥면은 X축, Y축 및 Z축 방향 변위 고정 조건으로 가정하였으며, 말뚝과 충전재, 충전재와 지반사이의 격자요소망은 조밀도를 향상시켜 해석을 수행하였다.

4.2 해석 조건 및 재하 단계

해석에 가정한 지반은 실트질 모래와 화강풍화토를 구성된 지반으로써 Mohr-Coulomb의 구성법칙을 만족시키는 재료이며, Table 5에서 보는 바와 같이 해석에 적용된 지반의 단위중량과 탄성계수, 강도정수는 현장재하시험을 수행한 지반조사에서 도출된 정수값을 적용하였다.

시공단계는 총 9단계로서 원지반 응력을 재현한 상태에서 말뚝시공 단계를 거쳐 이후 재하하중을 300kN 씩 증분시켜 최종 9단계의 누적하중이 2,400kN이 되도록 설정하였다. 각 단계별 해석 모델링은 Fig. 11과 같다.

4.3 해석 결과

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 하중-변위곡선과 재하단계별 말뚝의 축방향 하중전이곡선을 나타낸 것이다. 하중전이곡선에서 말뚝의 극한지지력은 선단지지력과 주면마찰지지력으로 구분하며, 해석결과 선단에 작용하는 하중이 시멘트 페이스트의 경우에는 529ton, 고화처리 충전재는 618ton으로 시멘트페이스트의 주면마찰저항력이 약간 크게 도출되었다. 이는 시멘트 페이스트와 고화처리 충전재가 지반과의 마찰력 차이로 인한 주면하중전이 거동으로서, 말뚝의 주면저항력은 재하 초기단계에서는 지반과 충전재사이의 부착에 의해, 하중의 증가에 따라 부착이 파괴된 후에는 충전재와 말뚝사이의 마찰에 의해 발현된다. 시멘트 페이스트와 고화처리 충전재의 경우 모두 변위의 증가에 따라 주면저항력은 지속적으로 증가하고 있으며, 재하하중이 커질수록 고화처리 충전재가 시멘트 페이스트보다 먼저 소성파괴가 발생함을 나타내었다.

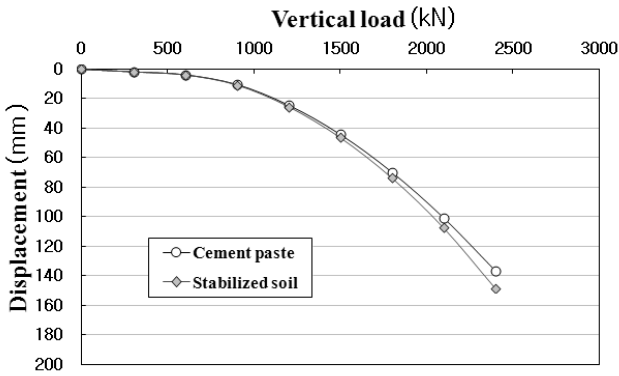
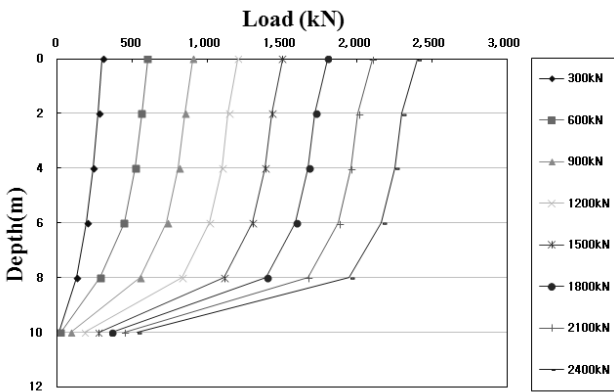
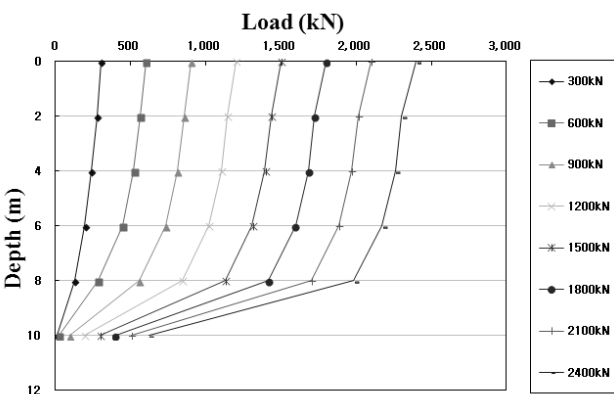


Fig. 12. Compared with vertical load and displacement



(a) Cement paste



(b) Stabilized soil

Fig. 13. Load transfer curve

5. 결론

본 논문에서는 매입말뚝 천공 시 발생하는 현장 발생토를 충전재로 재활용하기 위하여 고화처리 충전재의 역학적 특성을 도출하여 기존 사용되고 있는 시멘트 페이스트와 비교하여 현장적용성을 평가하였다. 또한, 매입말뚝 시공 시 말뚝 주변부에서 발생하는 굴착토사와 고화제를 적정 배합한 고화처리 충전재를 이용하여 재하시험 및 하중전이 계측을 수행하여 말뚝의 축방향 지지거동을 분석 하

였고, 현장조건과 동일한 스케일을 대상으로 수치해석을 통하여 충전재에 따른 하중전이 특성을 평가하여 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

고화처리 충전재는 기존 시멘트페이스트에 비해 유동성과 재료분리저항성 및 부착강도에서는 좋은 성능을 발휘하였으나, 동재하시험에 의한 주변마찰력은 다소 저하되는 결과를 보여 고화처리 충전재는 시멘트 페이스트 충전재와 유사한 성능을 나타내었다. 또한, 동재하 시험 및 하중전이시험 결과, 기존 사용하고 있는 시멘트페이스트에 비해 평균 단위마찰력은 다소 저하되는 결과를 보였으나, 경험식에 의한 설계극한주면마찰력을 기준으로 설계 지지력 이상으로 도출되었으며, 수평재하시험의 결과, 기존 시멘트 페이스트 보다 현장발생토의 입자가 크기 때문에 지하수에 의한 유실이 적어 상부구간이 밀실하게 채워져 수평저항 성능이 다소 크게 나타나 매입말뚝 충전재로서 고화토의 적용성을 확인하였다.

수치해석 결과, 말뚝의 주변저항력은 재하 초기단계에서는 지반과 충전재사이의 부착에 의해, 하중의 증가에 따라 부착이 파괴된 후에는 충전재와 말뚝사이의 마찰에 의해 발현됨으로써 시멘트 페이스트와 고화처리 충전재의 경우 모두 변위의 증가에 따라 주변저항력은 지속적으로 증가하고 있으며, 재하하중이 커질수록 고화처리 충전재가 시멘트 페이스트보다 먼저 소성파괴가 발생하였다. 따라서 충전재로서의 구조적 역할과 경제성 및 환경적인 측면을 고려한다면, 고화처리 충전재의 적용 가능성을 매우 효과적일 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by the Incheon National University Research Grant in 2013.

References

1. ASTM Standards C940-98a (2003), *Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM International, West Conshohocken.
2. ASTM Standards D6103 (2004), *Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material (CLSM)*, ASTM International, West Conshohocken.
3. Choi, H.B., Noh, C.S., Han, B.K., Lee, H.G. (2011), "Estimation of field application for the PHC pile backfill

- recycling in-site soil”, *2011 Spring The Korea Institute of Building Construction Conference*, Vol. 11, No. 1, pp. 63-66. (in Korean)
4. Das B. M. (2009), *Principle of Foundation Engineering*, 6th edition, Thomson.
 5. EXT (2012), *A Study of the minimization of waste and recycling of the in-site soil in the drilling of the bored-precast pile*, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement. (in Korean)
 6. FHWA (1998), *Design and Construction of Driven Pile Foundations-Workshop Manual Volume II*, Federal Highway Administration, Mclean, VA, pp.1-19.
 7. Kim, B.I., Wee, S.H., Lee, S.H., Kim, Y.U. (2003), “Strength characteristics of soil-cement mixed with inorganic solidification liquid”, *Korea Society of Civil Engineers*, 23(3C), pp. 135-141. (in Korean)
 8. Kim, K.W., Chai, J.G., and Han, B.K. (2012), “Applicability of solidified Soil as a Filling Materials of Bored Pile”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 11, No. 3, pp. 37-42. (in Korean)
 9. Korea Land & Housing Coporation (2010), *LH Construction Specifications 30535*. (in Korean)
 10. KS F 2405 (2010), *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete*, Korean Agency for Technology and Standards. (in Korean)
 11. Oh, S.H. (2011), *Evaluation of Field Application of Surface Reinforcement Method using Stabilized Soil and Rotary*, M.S. thesis, Univ. of Incheon. (in Korean)
 12. Park, J. B. (2004), “Strength and Friction Behavior of Cement paste poured in the Bored Pile”, *Journal of the Korean Geo-environmental society*, Vol.5, No.3, pp.31-39. (in Korean)
 13. Park, J. H., Lee, K.H., Jo, J.H., Kim, S.N. (2004), “Deformation characteristics of underground pipe with in-site soil CLSM”, *Journal of Korea Geotechnical Society*, 20(3), pp.129-139. (in Korean)