

폐기물을 활용한 저투수성 오염토양의 정화 및 안정화 기술 개발 Development of Remediation and Stabilization Technique for Low-Permeable Contaminated Soil Using Waste Materials

박상규¹⁾, Sang-Kyu Park, 이기호²⁾, Ki-Ho Lee, 박준범³⁾, Jun-Boum Park

- ¹⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University
²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후과정, Post Doc, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University
³⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Study was performed to develop the 'environmental double pile' for the remediation of low-permeable contaminated soil. This technique is similar in function to 'sand drain pile'. But this applies recyclable oyster shell treated as waste materials to a drain material and the pile is consisted of two layers. Inner metal pile is located in center and oyster shells are filled around it. By this technology, contaminated ground water is pumped out through the oyster shell and purified by drainage, adsorption, and reaction processes. Afterwards, the grout material is injected through the inner pile for the effect of the solidification / stabilization. As a result, the concept of this technique is a development of one-step process technology. Through the test, a consolidation characteristic by radial drain is going to be evaluated and the optimum standard of this technology will be calculated.

Key words : oyster shell, environmental double pile, grout, in-situ modeling test, remediation, solidification

1. 서 론

삼면이 바다인 우리나라는 그 특성상 투수성이 낮은 지반이 다수 존재하며, 내륙 산간 지방의 경우 대부분 표토가 화강풍화토인데 이는 물을 많이 함유하면 고소성, 고함수비의 세립토 특성을 나타내고 건조해지면 파쇄성이 높은 입상체의 특성을 나타낸다. 특히, 임해공업단지가 많이 조성되어 있는 우리나라의 경우 공장지대부근의 해성연약지반이 오염되어 있고, 오염될 가능성도 상당히 높은 것으로 판단된다. 이러한 투수성이 낮은 지반이 오염된 경우에는 증기추출법, 양수처리방법 등과 같은 기존의 처리방법을 적용하기가 어려우며, 오염된 토양을 굴착하여 다른 지역에 매립하는 식의 방법도 오염된 지역이 넓은 경우엔 경제적, 시간적 부담이 가중되어 적절한 방법이라고 할수 없어 이러한 지역에 맞는 새로운 정화기법의 개발이 요구된다고 할 수 있다.

따라서, 기존의 정화방법을 적용하기 어려운 오염된 저투수성 실트지반의 정화기법으로서 환경이중파 일 기술을 개발하고자 한다. 환경이중파일 기술은 투수성이 낮은 오염된 연약 지반을 굴패각과 같은 폐

기물을 활용하여 오염 정화 및 지반의 안정화를 유도하여 지반오염정화와 지반개량효과를 동시에 얻을 수 있다. 따라서, 본 기술은 오염 정화 목적 외에 굴폐각과 같은 폐기물을 활용함으로써, 매립 등으로 인해 이차오염원으로 취급되어온 폐기물을 유용한 자원으로 변화시키는 환경친화적 기술이라 할 수 있으며, 또한 지반 정화 이후 추가의 지반 개량 공법의 적용없이 기초 지지력의 확보를 통해 부지를 재활용할수 있으리라 판단된다. 따라서, 환경이중파일 기술은 폐기물을 활용하여 저투수성 오염지반을 정화하고, 정화효과와 더불어 지반의 안정화 효과를 기대할 수 있는 One Step Process기술이라 할 수 있다.

환경이중파일 기술은 기본 이론에서는 연약지반의 압밀촉진 목적으로 사용되는 샌드드레인 파일을 응용하였다. 환경이중파일은 내부와 외부의 이중파일로 구성되는데, 내부 파일이 중심에 위치하고 그 둘레 방향으로 굴폐각이 충전되어 전체적으로 이중파일의 형식을 갖게된다. 한편, 내부 파일은 둘레에 천공된 유공을 가지고 있어 배수구와 주입구의 역할을 한다.

본 기술의 적용과정은 다음과 같다. 지반내에 오염된 지하수는 충전재인 굴폐각을 통과하는동안 정화되어 내부파일을 통해 지반 밖으로 배출된다. 또한, 배수의 종료후 내부파일을 통해 지반 안정제를 주입하여 이중파일을 고형화시켜 하나의 말뚝을 형성하게 된다. 이를 통해 충전재내에 잔류하는 오염물질을 고정시키고, 정화된 지반을 안정화시킬수 있다.

그림 1과 2는 각각 환경이중파일의 모식도와 지반주입을 통한 말뚝의 형성을 나타낸다.

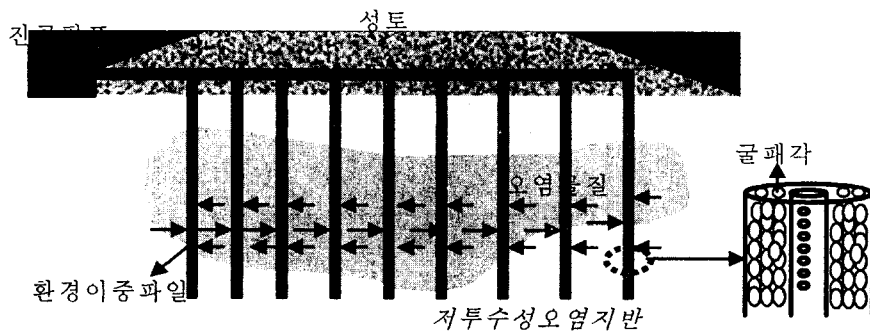


그림 1. 환경이중파일의 모식도

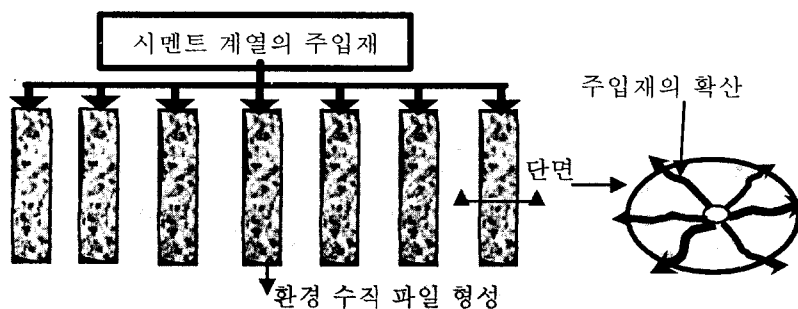


그림 2. 지반의 말뚝 형성

이와 같은 배경으로부터, 환경이중파일 기술의 현장 적용성을 평가하기 위해, 현장의 조건을 실험실 scale로 모사한 실험기계를 제작하였으며, 실험을 통해 평가하고자 하는 본 연구의 목표를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 충전재로 사용되는 굴폐각의 흡착특성을 이용하여 오염물의 정화능을 평가하고자 한다.
- (2) 굴폐각을 활용한 환경이중파일의 배수특성을 평가하고자 한다.
- (3) 그라우팅에 의해 형성된 이중파일 말뚝의 강도특성을 평가하고자 한다.

2 실험 개요

2.1 실험 기기

일반적으로 사용되고 있는 방사형압밀시험(Radial consolidation test)을 응용한 현장모델링 실험기는 현장의 조건과 상황에 가장 근접하여 시험을 할 수 있도록 제작하였다. 상부의 재하장치와 하부의 배수 장치에 의해 압밀과 배수가 진행되고, 이후 Cell의 상부에 설치한 주입장치를 통해 그라우팅 시험을 할 수 있는 실험기다.

실험 기기는 그림 3과 4에 제시된 바와 같다. Cell의 직경 26cm는 중심의 이중과일이 차지하는 직경 6cm를 제외하면, 수평배수거리가 각각 10cm가 되도록 설계되었다. 이중과일의 총 직경 6cm중 중심의 2cm는 내부 과일이 차지하고, 그 둘레 방향으로 충전재(굴폐각)가 채워질 수 있게 제작되었다. 압밀은 상부의 공기주입을 통하여 이루어지게 되는데, 이는 외부 Compressure와 연결하여 주입한다. 실험에 쓰일 내부 과일은 일회용 소모품을 감안하여 아크릴 소재를 사용하였으며, 직경 2cm, 높이 50.5cm의 과일에 둘레방향 7mm, 높이방향 10mm 간격으로 직경 2mm 크기로 천공 작업을 하였다. 배수가 종료된후 그라우팅을 할 수 있도록 Cell 위쪽으로 주입장치를 제작하였다.

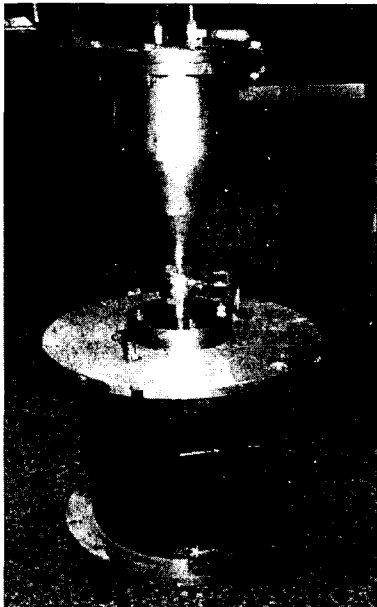


그림 3. 현장모델링 실험기

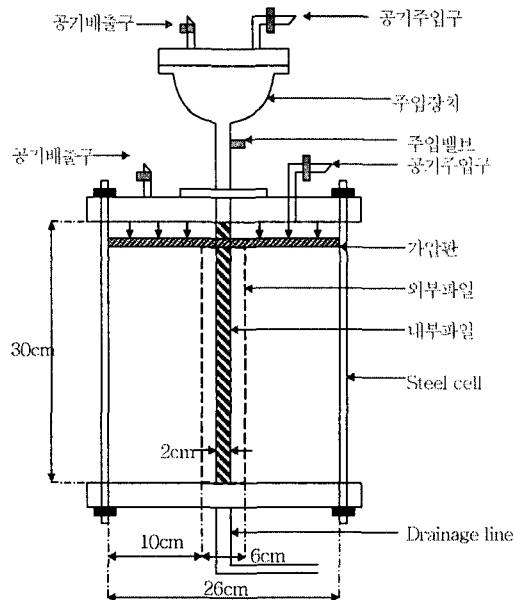


그림 4. 현장모델링 실험기 단면도

2.2 시험 조건

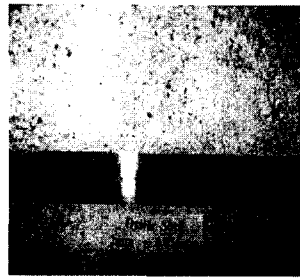
본 시험에서는 대상 지반의 조건으로 각각 화강풍화토와 해성점토를 사용하였다. 해성점토는 시험기의 조건을 고려할 때 이에 필요한 불교란 시료를 확보하는 것이 어렵기 때문에 남해안 통영지역에서 교란된 상태로 직접 채취하였다. 화강풍화토 시료는 #4번체로 체가름 한 것을 사용하였다. 또한, 해성점토 시료는 채취해온 상태 그대로 해수를 첨가하여 입자간의 포화도를 높이면서 고함수비 상태로 보관하였고, 시험결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하였다.

충진재로 사용된 굴폐각은 경남 통영의 어촌에 야적된 것을 수거하여 사용하였다. 수거된 시료는 일단 세척하지 않고 햇볕에 일주일 이상 건조시킨 후 시료 표면의 유기물들을 제거하였다. 또한, 굴폐각 입경은 직경 4.75~2.00 mm와 2.00~0.074 mm의 2종류의 굴폐각을 준비하였으며, 굴폐각 원석과 파쇄한 입자는 그림 5와 같다. 굴폐각 입자에 대해 비중시험을 KS F2302 규정에 따라서 실시한 결과 2.4로 모래와 유

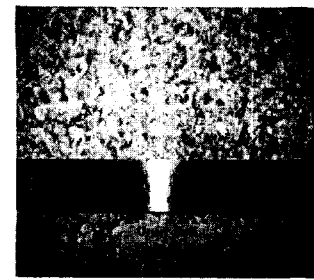
사한 값을 나타냈다. 주입재로는 조강시멘트를 사용하였는데, 이는 일반 포틀랜드 시멘트를 사용할 경우 양생기간이 긴 문제점을 해결하기 위함이다.



(a) 굴폐각 원석



(b) 큰입자
(2.00~4.75 mm)



(c) 작은입자
(0.074~2.00 mm)

그림 5. 굴폐각 시료

2.3 시험 절차

본 시험은 저투수성 지반에 환경이중과일이 설치된 형상을 모형화하여 진공 압밀에 의한 개량과 주입 공법에 의한 안정화를 조사하기 위한 시험으로서 시료의 압밀은 외부에 연결된 Compressure의 가압에 의해 발생된다.

환경이중과일을 설치한 후 압밀/배수와 주입시험을 실시하기 위한 자세한 과정을 설명하면 다음과 같다.

- ① Cell 내부에 이중과일(내부 : 배수/주입용 과일, 외부 : 충전용 과일)을 장착한 후, Cell 내부에 화강 풍화토 시료(또는 해성점토)를 채운다.
- ② 내부과일과 외부과일 사이의 공간을 굴폐각으로 충전한다. 시료의 다짐을 통해 충전재인 굴폐각의 상대밀도를 조절한 후 충전용 과일을 제거한다.
- ③ 외부와 완전히 차단한 후, 1 kg/cm^2 의 공기압을 통해 압밀시킨다. 이때 기기 하부의 배수관을 개방하여 실시간으로 배수량을 측정한다.
- ④ 압밀이 끝나면 배수관을 닫은 후, 주입장치를 통해 그라우팅을 실시한다. (주입압은 1 kg/cm^2 에서 시작하여 3 kg/cm^2 까지 서서히 증가시켜 10분동안 가압한다.)
- ⑤ 시험 종료후 시료의 높이 변화량과 충전재와의 거리별로 시료를 채취하여 함수비를 측정한다. 또한, 주입시험을 통해 형성된 이중과일 말뚝의 형성 상태를 관측하고 디지털 촬영을 실시한다.

3 실험 결과 및 분석

전술한 바와 같이, 환경이중과일의 현장 적용성을 평가하기 위해 실험기를 제작하여 현장모델링 실험을 실시하였다. 전술한 시료가운데, 현재 화강풍화토를 대상으로 실험을 실시하였고, 굴폐각은 입경 4.75-2.00 mm의 큰입자 굴폐각을 사용하였다. 또한, 오염을 시키지 않은 조건에 대한 실험을 실시하였으며, 굴폐각의 오염물 흡착시험은 현장모델링 실험과 분리하여 실시하였다. 현장모델링 실험을 통한 배수경로와 주입재의 확산경로를 살펴보면 그림 6, 7과 같다.

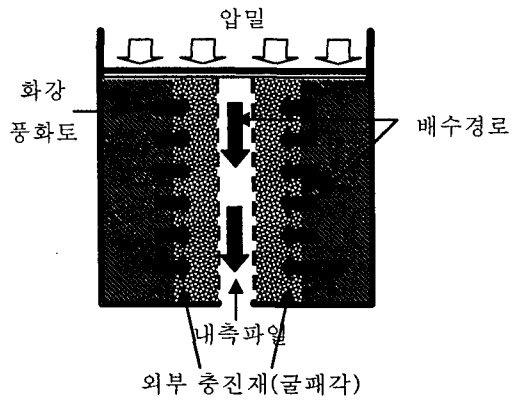


그림 6. 현장모델링 배수 경로

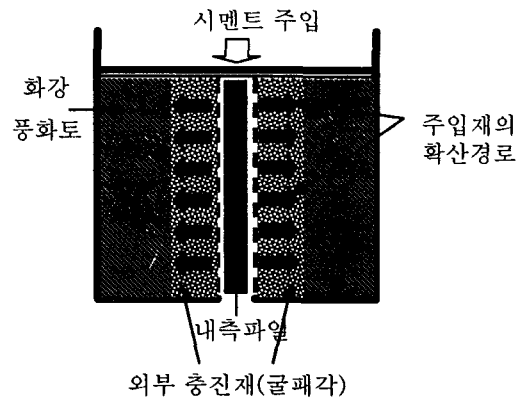


그림 7. 현장모델링 주입재 확산 경로

그림 8과 9는 각각 시험 종료후 시료의 상단면과 따로 분리해낸 이중파일 말뚝을 나타낸다. 또한, 그림 10은 형성된 말뚝의 직경과 길이를 나타내고 있다. 직경은 약 6 cm, 길이는 27 cm로 측정되었으며, 직경은 실험전과 차이가 없고 길이가 3cm 감소하였다.

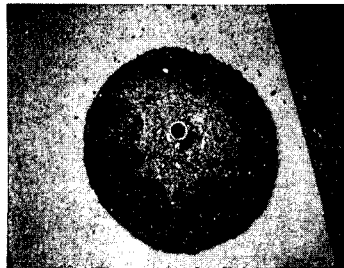


그림 8. 시료의 상단면



그림 9. 이중파일 말뚝

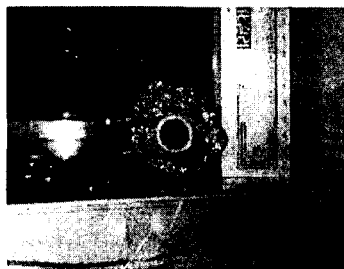


그림 10. 이중파일 말뚝의 직경과 길이

제시된 그림과 같이, 배수종료후 주입실험을 통해 내부의 파일과 굴패각으로 구성된 시멘트 말뚝이 형성되었다. 이중으로 구성된 말뚝의 구조로 인해 정량적인 강도 측정을 실시하긴 곤란하였으나, 겉보기 평가에 의한 말뚝의 강도는 견고하였다. 따라서, 굴패각과 시멘트로 이루어진 말뚝의 정확한 강도평가를 위해 일축압축강도 시험을 실시하였다. 한편, 현장모델링 실험의 횡방향 압밀배수 특성은 시험기의 제약으로 인해 현재 정확한 평가가 이루어지지 않았으나, 추후 대형 압밀토조시험기를 제작하여 그 특성을 평가할 계획이다.

4 일축압축강도 시험

4.1 시험 개요

전술한 바와 같이, 현장모델링 실험결과 형성된 이중파일 말뚝의 강도를 평가하기 위해 일축압축강도 시험을 실시하였다. 공시체의 배합은 표 1과 같이 시멘트 페이스트의 물/시멘트 비를 1:1로 하고, 시멘트 페이스트내에 각 입자별로 구분된 골패각을 시멘트의 중량을 기준으로 100%, 150%, 200% 혼합하였다. 시멘트 페이스트의 물/시멘트비를 1:1로 한것은 파쇄한 골패각의 혼합비 증가 등을 고려하여, 가능한 다양한 혼합비의 공시체를 제작하기 위해 통상적으로 콘크리트 배합시 사용되는 0.5~0.6보다 다소 높은 값을 사용하였다. 골패각의 혼합에 의한 강도변화특성을 물과 시멘트만으로 제작된 순수 시멘트 페이스트의 강도를 기준으로 비교하였다.

일축압축강도 시험은 KS F2314 규정에 준하여 실시되었으며 컴퓨터식 만능재료시험기(KSU 200C)를 이용하여 변형률 제어 방식으로 1mm/min의 속도로 연직하중과 연직변위를 측정하였다. 공시체의 규격은 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 를 사용하였다. 양생기간에 따른 압축강도의 특성을 파악하기 위해, 양생기간을 7일(초기강도), 28일(설계기준강도), 60일(장기강도)로 구분하였고, 시험결과의 신뢰성 확보를 위해 3개의 동일 혼합조건의 공시체를 제작하였다. 제작한 공시체는 공기 중에서 1일 양생한 후 몰드를 제거한 후 남은 기간 수중에서 양생하였다. 골패각의 혼합에 의해 발생한 공시체 상하부면의 요철은 양생이 끝난 공시체를 재하하기전 그라인딩 작업을 통해 제거하였고, 재하시 편심이 발생하지 않도록 수평면을 확보하였다. 또한 재하 초기단계부터 변형의 발달특성을 디지털카메라로 촬영하였고, 일정시간마다 공시체의 파괴형태를 기록하고 스케치하였다.

표 1. 공시체의 혼합조건

중량비 (시멘트:물:골패각)	시멘트 (g)	물 (g)	골 패 각 (g)	
			큰입자 (4.75-2.00mm)	작은입자 (2.00-0.074mm)
Pure cement paste	151.9	151.9	0.0	
1 : 1 : 1	115.4	115.4	115.4	
1 : 1 : 1.5	103.0	103.0	154.5	
1 : 1 : 2	93.0	93.0	186.1	

4.1 시험 결과

시멘트 혼합체에 대한 일축압축강도시험 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2. 일축압축강도 시험 결과

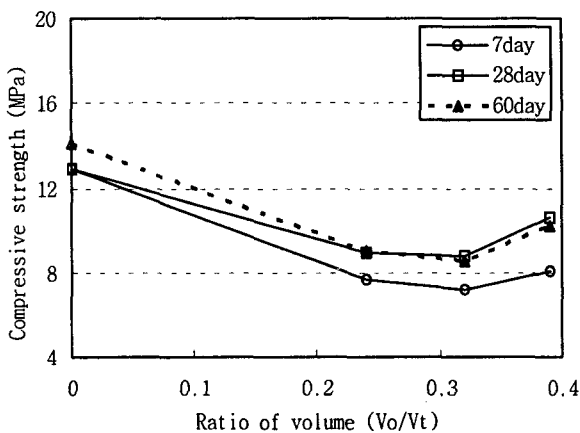
구분	시멘트중량 기준 골패각 혼합비	압축강도 (MPa)		
		7 일	28 일	60 일
순수시멘트페이스트	0 %	12.9 (100)	12.9 (100)	14.1 (100)
큰입자 골패각	100 %	7.7 (59.7)	8.9 (69)	9.0 (63.8)
	150 %	7.2 (55.8)	8.8 (68.2)	8.5 (60.3)
	200 %	8.1 (62.8)	10.6 (82.2)	10.2 (72.3)
작은입자 골패각	100 %	11.1 (86)	14.1 (109.3)	13.9 (98.6)
	150 %	10.8 (83.7)	13.2 (102.3)	12.8 (90.8)
	200 %	7.7 (59.7)	11.6 (89.9)	12.0 (85.1)

* () : PCP의 강도를 100으로 한경우의 압축강도비

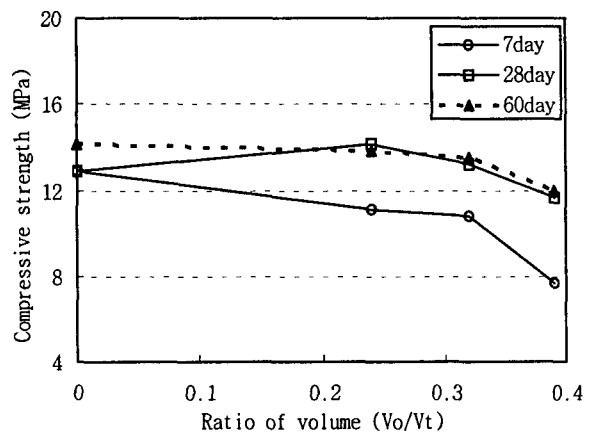
표 2의 결과는 입경차로 구분된 굴패각을 각각 시멘트의 중량을 기준으로 100, 150, 200 %의 3종류로 혼합한후 재령 7일, 28일, 60일에 대하여 각각 3회의 시험을 수행한 결과의 평균값이다. 표 2에 의하면 작은입자 굴패각 공시체의 강도가 큰입자 굴패각 공시체보다 대부분 크게 나타났다.

그림 11의 (a), (b)는 굴패각의 체적비에 따른 재령별 압축강도를 나타내고 있으며, 각각 $V_o/V_t = 0$ 인 지점은 순수 시멘트페이스트의 압축강도를 나타낸다. 그림11의 (a)에 의하면, 큰입자 굴패각 공시체는 굴패각의 체적비가 증가할수록 순수 시멘트페이스트에 비해서 압축강도가 급격히 감소하는 경향을 보이고 있으나 체적비 0.32 이후부터는 강도가 증가하기 시작해 뚜렷한 강도증진을 보이고 있다. 그림 11의 (b)에 의하면, 작은입자 굴패각 공시체는 굴패각의 체적비가 증가할수록 순수 시멘트페이스트와 비슷한 압축강도를 보이면서 완만하게 감소하다가 체적비 0.32 이후부터 강도가 감소하고 있다.

이러한 압축강도 변화의 관계는 살펴보면, 그림 11과 같이, 혼합체의 압축강도는 큰입자 굴패각 공시체가 상대적으로 작은 값을 나타내지만, 특징적인 것은 체적비가 증가함에 따라 감소하던 압축강도가 다시 증가하여, 체적비 0.4부근에서는 작은입자 굴패각 공시체와 유사한 값을 나타낸다.



(a) 큰입자 굴패각



(b) 작은입자 굴패각

그림 11. 체적비에 따른 재령별 압축강도 변화 (V_o :굴패각의 체적, V_t ::전체 체적)

지금까지 실시한 현장모델링 실험에서는, 큰입자 굴패각을 사용하였으며, 형성된 말뚝의 시멘트와 굴패각의 중량비는 1:2로서 그림 11의 체적비 0.4에 해당된다. 추후 굴패각의 입경과 체적비에 변화를 주어 실험을 실시할 예정이다.

6 결론 및 향후 계획

저투수성 오염지반의 정화 및 안정화를 위한 One Step Process 기술인 환경이중파일의 현장 적용성을 평가하기 위한 현장모델링 실험을 실시한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 현장모델링 실험 결과 배수를 통해 지반개량의 효과를 나타내었다. 또한 내부의 파일과 굴패각으로 구성된 시멘트 말뚝이 형성되었으며, 겉보기 평가에 의해 말뚝의 강도는 견고하였다.
- (2) 이중파일 말뚝의 강도를 평가하기 위해 일축압축강도 실험을 실시한 결과, 작은입자 굴패각 공시체의 강도가 큰입자 굴패각 공시체보다 대부분 크게 나타났다. 또한 작은입자 굴패각의 경우 체적비가 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 보이지만, 큰입자 굴패각의 경우는 증가한다. 따라서 큰입자 굴패각의 경우 체적비가 증가함에 따라 감소하던 압축강도가 다시 증가하여, 체적비 0.4부근에서는

작은입자 굴폐각 공시체와 유사한 값을 나타낸다.

- (3) 현장모델링 실험의 횡방향 압밀배수 특성을 평가하기 위해, 추후 대형 압밀토조시험기를 제작하여 압밀실험을 실시할 계획이다.
- (4) 현장모델링 실험의 오염물 정화능을 평가하기 위하여, 중금속으로 오염된 시료를 대상으로 실험을 실시할 예정이며, 현재 굴폐각의 중금속 흡착특성에 대한 실험이 별도로 진행 중이다.

참고문헌

1. 박홍재, 이봉헌(2001), “폐 채침과 굴폐각의 재활용에 관한 기초 연구”, *한국폐기물학회지*, 제 18권 4호, pp. 319-325.
2. 윤길림, 김명탁, 김준형, 채영수, 서승남, 심재설(2001), “굴폐각을 혼입한 모르타르 혼합토의 강도특성 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제 17권 5호, pp. 51-60.
3. 윤현석, 박준범, 이기호, 홍승철(2002), “산업부산물에 대한 BTE(Benzene, Toluene, Ethyl-benzene)의 흡착 특성”, *한국폐기물학회지*, 제 19권 3호,
4. 이기호(2001), “폐기물을 포함한 이종혼합토의 강도·변형특성”, *한국지반환경공학회논문집*, 제 2권 2호, pp 33-39.
5. 이기호, 박준범(2001), “굴폐각을 포함한 혼합토의 전단·변형 특성 평가를 위한 균질화법의 적용”, *한국지반공학회논문집*, 제 17권 4호, pp 183-190.
6. 이기호, 한종욱(2001), “굴폐각 혼합토의 압밀 및 투수특성”, *대한토목학회논문집*, 제 21권 4-c호, pp 375-384.
7. Moseley, M. P.(1993), “Ground improvement”, *Bishopbriggs, Glasgow : Blackie Academic & Professional ; Boca Raton, Fla. : Published in the USA and Canada by CRC Press.*
8. Dept. of the Army, Corps of Engineers.(1984), “Engineering and design : grouting technology”, *Washington : Dept. of the Army*
9. Wallace Hayward Baker(1982), “Grouting in geotechnical engineering : proceedings”, *Conference on grouting in Geotechnical engineering*