

쇄석과 저회의 혼합다짐말뚝의 전단강도와 Clogging 현상 규명

Characteristics on Shear Strength and Clogging Phenomenon of Bottom Ash and Rammed Aggregate Mixture Compaction Pile

이 동 엽¹⁾ · 강 형 남²⁾ · 천 병 식[†]

Lee, Dongyeup · Kang, Hyongnam · Chun, Byungsik

ABSTRACT : The rammed aggregate compaction pile method is widely used as soft ground improvement method because of the installed piles improve not only overall composite capacity but also discharge capacity. But the discharge capacity is declined when the clogging is generated due to the clay penetration into voids of rammed aggregate compaction pile with the time elapsed. The purpose of this study is to reduce the clogging problem occurred in rammed aggregate compaction pile constructed in the soft ground and to minimize voids of rammed aggregate compaction pile. The proper mixing ratio was determined which is based on the results of the large scale direct shear tests conducted to get strength and permeability as optimum mixing ratio of crushed stone and bottom ash. The test results indicated that the highest internal friction angle was obtained at 80:20 mixing ratio of crushed stone and bottom ash. The internal friction angle was declined when the mixing ratio of the bottom ash increased over 20%. The results of the clogging tests, presented that the mixture of 80:20 crushed stone and bottom ash is highest effective of clogging than ratio of pure crushed stone.

Keywords : Rammed aggregate compaction pile, Clogging, Bottom ash, Internal friction angle

요 지 : 본 논문에서는 모래에 비해 배수성이 떨어지지 않으며 지지력이 우수할 것으로 판단되는 쇄석을 사용하여 연약점성토지반에서 쇄석다짐말뚝을 시공 후 쇄석간의 공극에 점토입자의 유입으로 인해 배수능을 상실하는 Clogging 현상에 대한 대체방안을 규명하고자 하였다. 이러한 Clogging 현상의 억제방안으로 국내 화력발전소에서 발생하는 산업폐기물인 석탄회 중 재활용 방안이 미비한 저회의 활용 가능성을 높여 보고자 쇄석과 저회의 적정 혼합비의 다짐시험에 따라 대형직접전단시험을 실시하여 최대전단강도와 내부마찰각을 파악하고, 그에 따른 Clogging 현상의 특성에 대해 실험을 실시하였다. 따라서, 쇄석과 저회의 혼합비에 따른 지지력 및 강도특성을 파악하여 적정 혼합비를 찾고, 현장과 같은 Clogging 현상을 육안으로 확인할 수 있도록 모형토조를 제작하였으며 적정 혼합비에 따른 배수능을 비교·분석하였다. 실험결과 각 혼합비에 따른 대형직접전단시험에서 쇄석과 저회의 혼합비가 80:20일 때 전단강도와 내부마찰각이 가장 크게 나타났으며 Clogging 시험에서도 쇄석 100%의 다짐말뚝보다 Clogging 억제 효과가 점진적으로 뛰어난 것을 확인하였다.

주요어 : 쇄석다짐말뚝, Clogging, 저회, 대형직접전단시험

1. 서 론

현재 연약지반개량을 위한 연직배수재로 샌드드레인과 인공배수재가 많이 사용되어져 왔다. 그러나 샌드드레인의 주 사용재료인 천연모래의 구득이 점차 어려워지고 있어 배수재료인 모래를 대체할 재료 개발의 필요성이 날이 높아지고 있다. 따라서, 고가의 모래를 대신해 상대적으로 훨씬 저렴하며 시공장비의 개발로 인해 페이퍼드레인, 플라스틱 보드 드레인 등의 인공배수재를 많이 사용하였다. 일본 역시 천연자원인 모래를 구득할 수 없도록 법으로 지정하여 모래를 수입하고 있는 실정이므로 모래의 대체가 매우 시급한 상황으로 다양한 시도가 이루어지고 있다.

천연자원 대체재로써 생산되어지는 다양한 인공배수재의 폭은 약 95~120mm, 두께는 4~8mm이므로 원형 직경으로 환산하면 불과 62~72mm 밖에 되지 않는다. 따라서, 400~500mm 직경의 천연배수재인 샌드드레인과 비교해 보면 개량효과에 대한 의구심을 가진다(한봉수 등, 2003). 또한, 현재 우리가 사용하고 있는 다양한 인공배수재는 몇 가지 문제를 야기하고 있으며 그 중 대표적으로 연약지반 위에 성토하여 압밀이 진행되면 지반침하와 측압에 의해 인공배수재의 변형과 휨 또는 꺾임현상이 빈번히 발생한다(김래현 등, 2009). 측압은 토압, 수압 그리고 과재하중으로 인해 증가된 압력으로 이루어지며 그 크기는 대략 깊이에 비례한다. 깊이 20m 아래의 인공배수재의 지하수위와 성토

1) 비회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.com)

무게에 따라 차이가 있지만 대략 $30t/m^2$ 의 축압을 받는 것으로 추정된다(김상규, 1995).

이러한 문제로 인하여 구둑이 용이하면서도 모래에 비해 배수성이 떨어지지 않으며 지지력이 우수할 것으로 판단되는 쇄석말뚝을 사용하여 다짐말뚝에 관한 실내시험과 연약 점성토지반에서 쇄석다짐말뚝을 시공 후 쇄석간의 공극에 점토입자의 유입으로 인해 배수능을 상실하는 Clogging 현상에 대한 억제방안을 규명하고자 하였다.

최근 많은 연구자들이 다양한 배수재의 Clogging 현상에 관한 연구를 하고 있다. 현재 터널 필터재 및 그라우트재의 폐색현상으로 인한 투수능 저하에 관한 연구와 흙 필터재의 폐색 등에 관한 연구가 되어졌다(이인모 등, 1998; 김종선 등, 2006). 또한, 흙/부직포 시스템에서 투수능 저하 현상의 실험적 연구와 현장조건을 고려한 연직배수재의 투수능 시험에 관한 연구가 이루어 졌다(이인모 등, 2000; 정승용 등, 2005). 고용일 등(2004)은 연약지반 개량용 인공배수재의 Clogging 현상에 관한 실험적 연구를 하여 Clogging 현상에 관한 다양한 연구가 진행되었다.

본 논문에서는 쇄석다짐말뚝에서 발생하는 Clogging 현상 억제 방안으로 산업폐기물인 저회를 활용하였으며 현재 석탄회를 재활용하고 있는 분야 중에 토질시공의 경우 경제적인 석탄회를 대량으로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다(천병식 등, 1990). 이처럼 천연자원의 고갈과 골재채취에 따른 환경문제의 부각으로 인하여 재료의 수급이 점차 어려워지며 대체 건설재료로서 경제성이 고려된 석탄회의 개발이 시급한 실정이다. 또한, 석탄회는 저회와 비회로 분리되며 비회는 현재 많은 분야에서 연구 개발되어 90% 이상이 정제되어 재활용되고 있으나 저회는 그 활용도가 미비한 실정이며 매장용량의 한계 때문에 많은 문제를 가진다. 저회는 사질토와 유사한 공학적 특성을 보이는바 그에 대한 연구가 활발히 진행되어야 할 것이다(천병식 등, 1999).

본 연구에서는 모래를 대신해서 현재 다양하게 사용되는 쇄석을 사용하여 말뚝체 형성으로 침하저감, 압밀배수, 활동저항과 전단변형 억제 및 강도증가를 위해 쇄석다짐말뚝을 적용하였으며 연약지반 내의 축압에 의해 쇄석간의 공극에 점토입자의 유입으로 인해 배수능을 상실하는 Clogging 현상 및 억제방안을 규명하고자 하였다. 현재 국내 10개 화력발전소에서 발생하는 산업폐기물인 석탄회 중 재활용 방안이 미비한 저회의 환경친화적, 안정적인 재활용 가능성을 높여 보고자 저회의 특성조사와 쇄석과 저회의 적정 혼합비의 다짐정도에 따라 대형직접전단시험을 실시하여 최대전단강도와 내부마찰각을 파악하고, 순수 쇄석말뚝과 최적 혼합비에 따른 혼합다짐말뚝의 Clogging 현상에 대해 실험을 실시하여 비교·분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 쇄석다짐말뚝공법 메카니즘

쇄석말뚝공법은 연약지반에 쇄석을 압입하여 큰 직경으로 다져진 쇄석말뚝을 조성하는 지반개량공법으로 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 조립질 재료를 연약한 점성토 지반 및 느슨한 사질토 지반에 치환율 10~35%로 쇄석말뚝을 조성함으로써, 연약한 점성토 지반에서는 기초지반의 지지력 증가와 침하량 감소 및 압밀배수에 의한 지반개량효과 등을 얻을 수 있으며, 사질토 지반에서는 지진발생시 액상화 방지를 목적으로 하는 공법이다.

점성토 지반개량에 있어서는 단기적으로는 주변점토보다 큰 전단강도를 가진 쇄석다짐말뚝을 조성해서 쇄석말뚝과 점토로 된 복합지반을 형성함으로써 지반의 지지력을 증가시키고, 장기적으로는 쇄석말뚝의 배수효과와 쇄석말뚝의 응력분담에 의해 압밀시간을 단축함과 동시에 압밀침하량을 감소시킨다.

쇄석말뚝공법의 주요 특징으로 지반 자체의 강도 및 밀도를 증가와 간극수압이 소산할 수 있는 배수경로를 형성한다. 또한, 진동과 변위로 인한 피해를 감소시키며 쇄석말뚝 주변지반의 측방응력을 증가시키며 쇄석기둥의 응력집중현상으로 인하여 저감효과를 기대할 수 있고 잔류침하가 조기 완료할 수 있다(한국해양연구원, 2001).

본 공법은 대상지반 조건에 따라 개량 메카니즘은 차이가 있으나 압밀정도를 개선하였으며 높은 전단력을 형성함으로써 실트, 점토 등의 다양한 범위의 개량을 위한 지반에 적용가능한 공법이다. 연약한 사질토 지반에서는 진동과 함께 압력수를 지중에 가하여 토립자 사이에 유효응력이 0이 되게 하고 구속력이 해제된 토립자는 가능한 더 조밀한 축으로 재배열됨으로서 다짐효과를 얻게 된다. 반면, 실트 및 점성토 지반에서는 진동과 압력수로 연약토를 탈락, 분출시켜 밖으로 흘러보내고 연약토가 빠져 나간 공간에 자갈이나 쇄석을 다져 자갈기둥을 형성하여 배수 또는 지반강도를 증대시켜 지반을 개량한다. 즉, 말뚝과 같은 원주형 개량체를 지중에 형성하여 지지력의 증가, 침하량 감소, 압밀도의 증가 그리고 연약하거나 느슨한 퇴적지반에서의 액상화 방지 등을 목적으로 사용되어질 수 있는 공법이다.

2.2 Clogging 메카니즘

현장에 설치된 배수재에 토립자나 유기물질, 염분, 미생물 등이 배수재 내부에 걸려 구멍이 막히고 부피가 팽창하는 과정을 Clogging 현상이라 하며, 입자간의 공극이 큰 배

수재와 인공배수의 부직포에서는 직물의 구조가 보다 복잡하고 구불구불해서 막힘의 위험이 크다. 형성요인에 따라 다음과 같은 4가지로 구분할 수 있으며 흡입자와 인공배수재의 필터구멍의 크기에 따라 Blocking, Blinding이 발생한다(Mlynarek 등, 1991).

- ① 광물 입자에 의한 막힘 : 대부분의 막힘현상, 흡입자와 침전물들이 배수재 속으로 이동하여 공극 속에 갇힌 상태.
- ② 산화 제2철에 의한 막힘 : 흙이나 물속에 남아 있는 철분이 박테리아 작용으로 인해 물에 녹지 않는 산화 제2철로 산화되어 배수재의 공극내에 침전되는 형태.
- ③ 염분에 의한 막힘 : 탄산염이나 황산염 등을 포함하는 물이 특히 인공배수재의 공극속으로 유입된 상태에서 증발되어 필터사이에서 소금결정체를 형성하는 형태로서, 건조기간이 오래 지속되면 점점 크게 성장하여 부분적인 막힘현상을 유발시킴.
- ④ 미생물에 의한 막힘 : 특히 인공배수재의 필터내의 박테리아 성장에 의해 흡속의 유기물이 부패되어 필터의 구멍이 부분적으로 막히게 되는 현상.

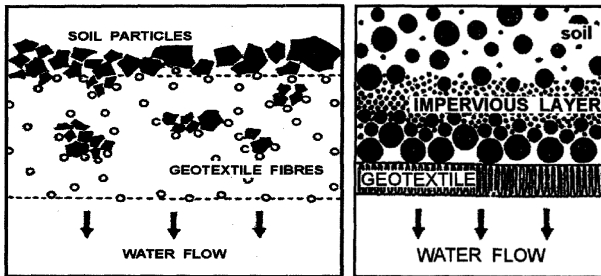


그림 1. Geotextile의 Blocking 현상과 Blinding현상(Mlynarek 등, 1991)

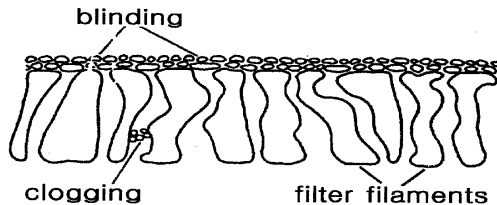


그림 2. 인공배수재 필터의 Clogging과 Blinding의 비교(Mlynarek 등, 1991)

표 2. 저희의 물리적 특성

구분	비중 (G_s)	흙의 분류법		Atterberg Limit		입도 분석				삼축압축시험			
		AASHTO 분류	통일분류	W _L (%)	I _p (%)	No.4 통과량	No.200 통과량	C _u	C _g	점착력	내부 마찰각	E _s (N/mm ²)	ν
저희	2.32	A-1-b	SW	N.P	N.P	88.0	1.5	13.3	1.3	0.02	33.6	8.775	0.0062

(1) Blocking

인공배수재 필터의 구멍크기와 같거나 약간 큰 흡입자가 비교적 높은 수압하에서 자유롭게 필터재에 도달하여 필터의 구멍입구를 막는 현상으로 현장 지반의 입도분포를 고려하여 적절한 인공배수재의 선정이 요구된다.

(2) Blinding

배수재에 인접한 지반의 흙이 배수재의 공극크기 보다 약간 큰 토립자의 이동을 허용하는 입도분포로 구성되어 있는 경우, 배수재 위에 비교적 낮은 투수성을 갖는 얇은 층이 위치하여 형성되는 현상으로 가는 모래나 실트질 흙의 지반에 발생되기 쉽다.

3. 시험 개요

3.1 사용재료

3.1.1 쇄석

본 실험에서는 충분히 세척한 후 건조하여 현장에서 적용되는 쇄석말뚝의 지름에 대한 쇄석입자의 지름비와 유사하도록 선별하여 비교적 양호한 입도분포를 가진 시료를 사용하였으며 기본 물리적 특성은 표 1과 같다.

3.1.2 저희

본 실험에서는 영동화력발전소의 저희를 #4번~#100번체에 걸러 완전 건조된 시료를 사용하였으며, 저희의 물리적 특성은 표 2와 같다.

3.1.3 사질토

본 실험에서는 주문진 표준사를 사용하였으며, 그에 따른 물리적 특성은 표 3과 같으며 사질토 및 쇄석, 저희의 입도분포곡선은 그림 3과 같다.

표 1. 쇄석시료의 물리적 특성

물리적 성질	Quantity
USCS	GP
비중, G_s	2.76
최대건조단위중량(KN/m ³)	15.48
내부마찰각(°)	43.2

표 3. 사질토시료의 물리적 특성

물리적 성질	Quantity
USCS	SP
비중, G_s	2.61
최대간극비	0.841
최소간극비	0.637
균등 계수	1.66
내부마찰각($^\circ$)	36.5
No.200제 통과율(%)	0.04

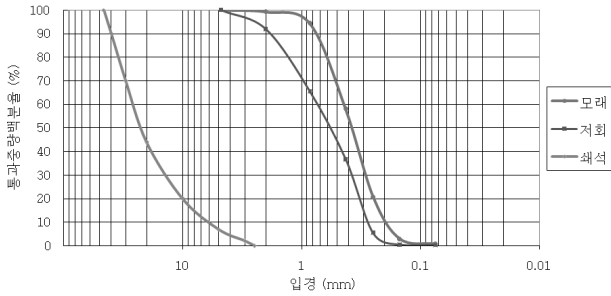


그림 3. 각 시료별 입도분포곡선

3.1.4 점성토

본 실험에서는 사용한 점성토는 전남 광양의 해성점성토를 채취하였으며 명확하고 균질상태로 실험하기 위하여 함수비 60% 상태로 규정하였고, 그 물리적 특성은 표 4와 같다.

3.2 시험 방법

3.2.1 시험개요

쇄석과 저회의 혼합비 변화에 따른 특성을 알아보기 위하여 대형직접전단시험, Clogging 시험, 다짐시험과 투수시험을 실시하였으며, 다짐시험은 KS F 2312에 근거하여 실

시하였고, 투수시험은 KS F 2322에 의거하여 실시하였다.

3.2.2 대형직접전단시험

대형직접전단시험에 관한 명확한 시험법이 정립되어 있는 않으나 보통 직접전단시험을 기준으로 하여 시험되고 있다(신동훈, 2000; 이대수 등, 2005; 한국수자원공사, 1999).

본 연구에서는 연약지반에 시공되어지는 쇄석다짐말뚝에 발생하는 Clogging 현상을 억제하기 위해 쇄석다짐말뚝의 공극을 최소화 하면서 전단강도를 증대시키는 방안으로 쇄석다짐말뚝의 공극에 저회를 채워 상대밀도를 증가시키는 방법을 고안하였다. 따라서, 쇄석과 저회의 혼합비를 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30으로 변화시켜가며 대형직접전단시험을 실시하여 적정배합비를 산정하였다. 본 시험에서는 수직하중을 60, 120, 180kPa으로 변화시켜 가면서 쇄석:저회의 각 혼합비에 대하여 1mm/min의 전단속도로 시험을 수행하였다. 대형직접전단시험 전경은 그림 4과 같다.

3.2.3 Clogging 시험

본 연구에서는 연약지반에 쇄석다짐말뚝 시공시 장기투수능 저하의 요인이 되는 Clogging 현상을 모사할 수 있는 모형토조를 제작하여 모형토조 내에 점토지반을 조성하고 각 배합비에 따른 혼합다짐말뚝을 시공하여 일정 축압을 가하여 시간경과에 따른 말뚝체의 투수능을 측정하고자 하였으며, Clogging시험기의 형태 및 구성은 그림 5와 같다.

Compressor로 일정 축압(300kPa)을 주면 모형토조 내 점토지반이 수압을 받아 압밀되고, 점토내 간극수가 투수계수가 큰 말뚝체를 통해서 배수되게 되는 구조이며, 일정축압 하에서 시간(약 8일)에 따른 Δh (투수능 수두차)를 측정하여 투수능을 비교·분석하였다.

표 4. 점성토시료의 물리적 특성

구분	비중 G_s	함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	습윤밀도 (KN/m^3)	최대건조밀도 (KN/m^3)	최적함수비 (%)	간극비	통일분류
점토	2.67	60	42	25	19.816	17.207	13.5	0.15	CL



그림 4. 대형직접전단시험 장치 전경

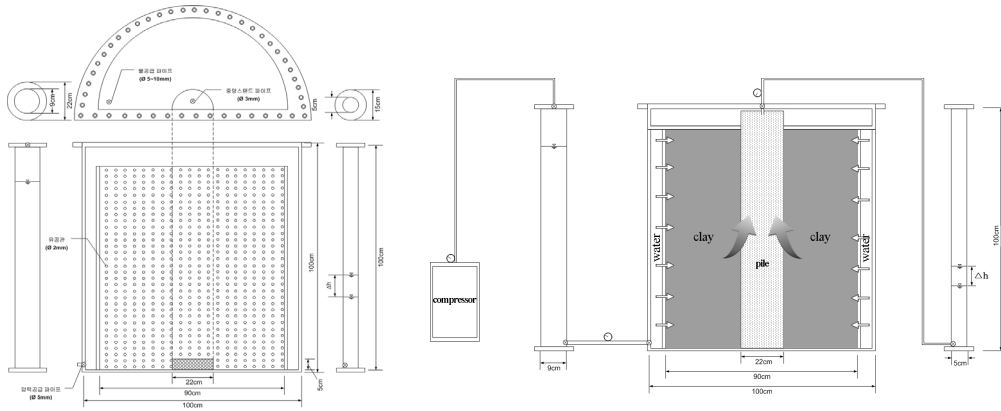


그림 5. Clogging시험기 형태 및 구성

표 5. 혼합비에 따른 건조다짐정도

다짐 횟수 (회)	혼합비에 따른 건조다짐정도(kg)						
	저회 100%	쇄석 100%	쇄석:저회 (90:10)	쇄석:저회 (85:15)	쇄석:저회 (80:20)	쇄석:저회 (75:25)	쇄석:저회 (70:30)
0	2.95	4.9	5.1	5.45	5.35	5.2	5
25	3.4	5.6	5.55	5.95	5.9	5.65	5.5
55	4.2	5.95	5.75	6.45	6.5	6.15	5.9
75	4.2	6.05	5.75	6.45	6.55	6.15	5.95

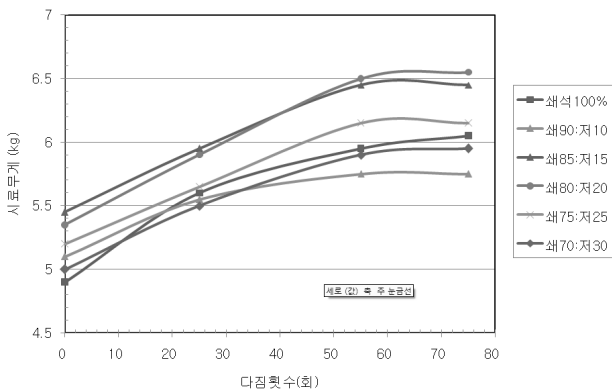


그림 6. 각 혼합비별 건조다짐시험 결과

4. 실험결과 및 분석

4.1 건조다짐시험

저회와 쇄석의 배합비에 따른 다짐시험은 대형직접전단 시험 및 Clogging 시험시 시료를 다져 다짐밀도를 결정하기 위해 실시하였으며 그 결과는 표 5 및 그림 6과 같다.

각 시료의 다짐정도를 파악하기 위하여 다짐횟수를 0, 25, 55, 75회 타격하였으며 각 시료의 배합비에 따라 그 무게를 나타내었다.

완전 건조된 시료의 다짐횟수에 따른 각 배합비별 밀도를 살펴보면 다짐횟수가 증가할수록 밀도가 증가하는 경향

을 나타내는데, 쇄석:저회 80:20의 밀도가 가장 크게 나타났다. 이로 인해서 각 배합비별 다짐횟수는 약 55회가 가장 효율적인 다짐정도이므로 대형직접전단시험 및 Clogging 시험에서 다짐말뚝 형성시 층별 다짐횟수를 55회로 결정하였다.

4.2 대형직접전단시험

쇄석다짐말뚝에서 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 내부마찰각이다(천병식 등, 2002). 대형직접시험을 통하여 도출된 쇄석:저회의 혼합비 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30에 대한 변위 및 수직응력(60kPa, 120kPa, 180kPa) - 전단응력의 그래프는 그림 7~13과 같으며 저회의 혼합비에 따른 내부마찰각과 최대전단응력의 변화는 그림 14와 표 6과 같다.

시험결과 쇄석과 저회 혼합비가 80:20일 때 내부마찰각이 가장 크게 나타났으며 저회의 혼합비가 20%를 넘어가면 내부마찰각이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 표 7과 같이 쇄석과 모래의 혼합비에 따른 내부마찰각 역시 쇄석과 저회혼합의 내부마찰각과 유사한 성향을 확인할 수 있었다. 따라서 저회와 모래는 전단강도시험에서 유사한 특성임을 확인할 수 있었으며 쇄석:저회 혼합비 80:20의 전단강도가 가장 큼으로 쇄석과 저회 혼합다짐말뚝의 적정 혼합비로 결정하였다.

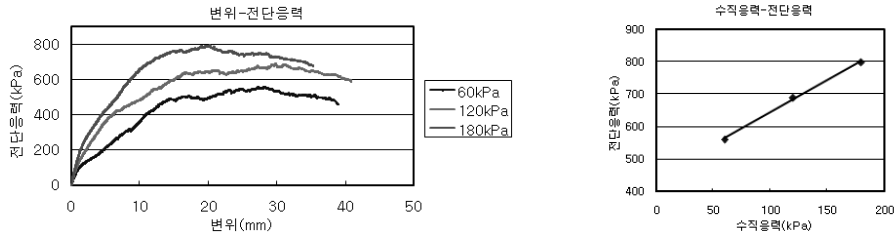


그림 7. 쇄석100% 전단응력 및 내부마찰각

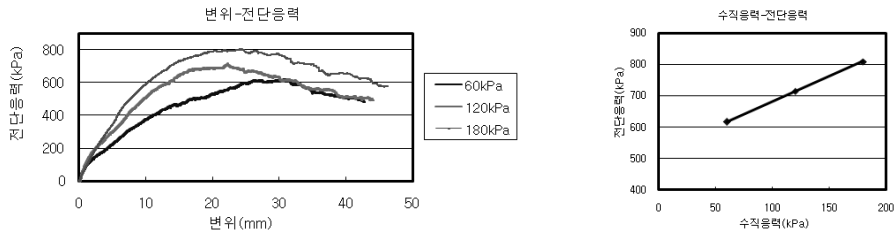


그림 8. 쇄석:저회(90:10) 전단응력 및 내부마찰각

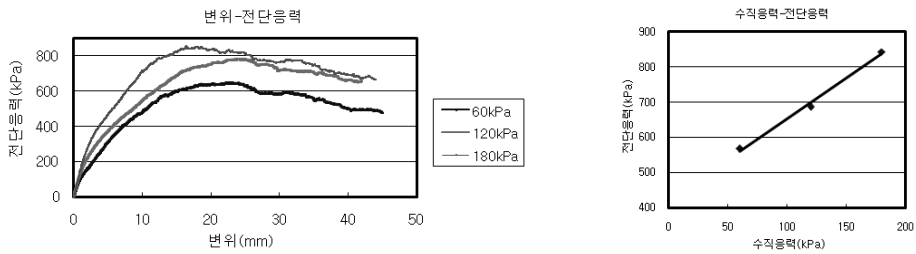


그림 9. 쇄석:저회(85:15) 전단응력 및 내부마찰각

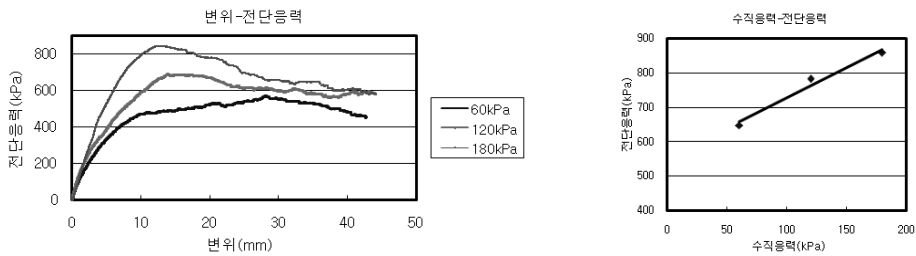


그림 10. 쇄석:저회(80:20) 전단응력 및 내부마찰각

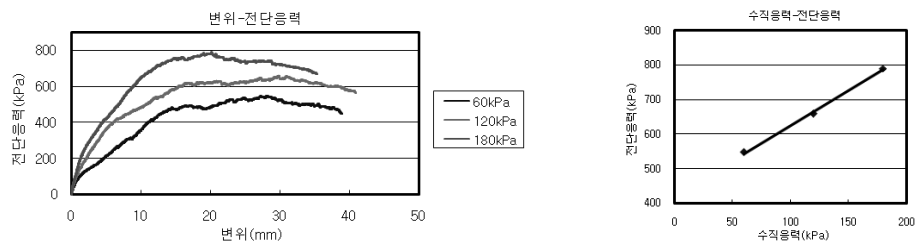


그림 11. 쇄석:저회(75:25) 전단응력 및 내부마찰각

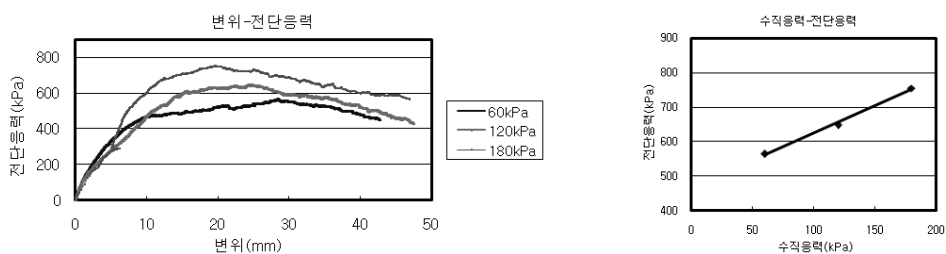


그림 12. 쇄석:저회(70:30) 전단응력 및 내부마찰각

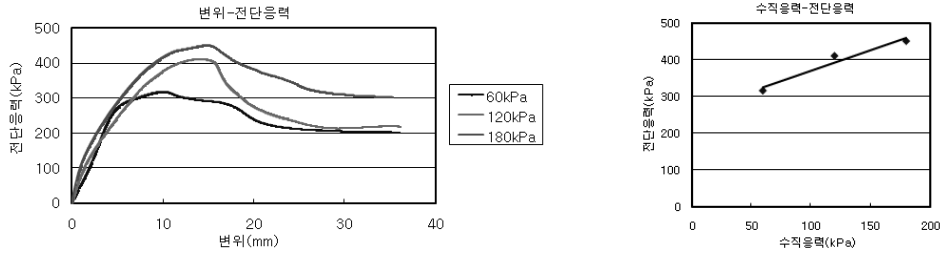


그림 13. 저회100% 전단응력 및 내부마찰각

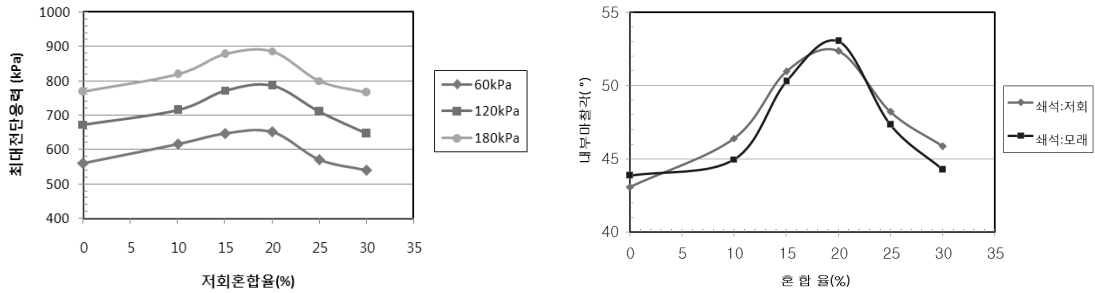


그림 14. 혼합률에 따른 최대전단응력 및 내부마찰각

표 6. 쇄석과 저회의 혼합비에 따른 최대전단응력

수직 응력	혼합비	최대전단응력(kPa)							
		모래 100(%)	저회 100(%)	쇄석 100(%)	쇄석:저회 (90:10)	쇄석:저회 (85:15)	쇄석:저회 (80:20)	쇄석:저회 (75:25)	쇄석:저회 (70:30)
60 kPa		240.622	317.055	560.509	617.036	647.501	650.861	571.057	539.784
120 kPa		288.747	410.474	672.733	714.995	771.859	786.014	708.967	646.451
180 kPa		345.364	450.106	767.678	818.679	877.387	885.595	799.412	765.947

표 7. 각 혼합비에 따른 내부마찰각 비교

혼합비 (%)	내부마찰각(°)	
	쇄석 : 저회	쇄석 : 모래
100 : 0	33.65	36.51
90 : 10	46.39	44.95
85 : 15	50.97	50.28
80 : 20	52.36	53.04
75 : 25	48.21	47.33
70 : 30	45.84	44.26

표 8. 각 시료에 따른 투수계수

구 분	투수계수(cm/sec)
저 회	7.61×10^{-3}
모 래	9.28×10^{-3}
쇄석 : 저회(80:20)	2.04×10^{-3}
쇄석 : 모래(80:20)	3.15×10^{-3}

4.3 정수위 투수시험

저회 및 모래의 초기 투수특성 파악을 위하여 각각의 투수계수를 구한 다음 대형직접전단시험에서 확인된 쇄석과 저회의 적정 배합비(80:20)에 따른 투수계수와 쇄석과 모래 배합비(80:20)의 투수계수를 비교·검토하였다.

그 결과 표 8과 같이 모래와 저회의 투수계수가 1.0×10^{-3} (cm/sec) 이상 나타났으며 비슷한 특성을 보였다. 또한, 쇄석과 저회 및 모래 각각의 혼합된 말뚝의 투수계수 역시 1.0×10^{-3} (cm/sec) 이상으로 투수성이 뛰어난 것을 확인 할 수 있었다.

4.4 Clogging 시험

연약점성토지반 하에서 말뚝이 받는 압력을 모사하기 위하여 말뚝측면에 일정 축압(300kPa)을 주입하여 빠르게 Clogging 현상을 파악하도록 하였다. 국내·외에서 쇄석다짐 말뚝이 시공된 말뚝깊이가 평균 7~12m로 조사되었으며 본 연구에 사용된 점성토(함수비 60%)의 10m 깊이 지반의 축압이 약 300kPa 이므로 다음과 같이 구속압을 결정하였다. Clogging 시험 결과 쇄석 100%로 시공된 다짐말뚝의 초기 투수능이 가장 크게 나타났으나 시간이 경과함에 따라 쇄석간의 공극 사이에 점토입자들의 유입으로 인해 Clogging 현상이 가장 빠르게 일어나 배수능이 점차 저하됨을 보였다. 앞서 시험한 대형직접전단시험에서 가장 큰 내부마찰각

을 보인 쇄석:저회(80:20)의 배합비에서 Clogging 현상이 쇄석 100%일 때보다 매우 천천히 일어나는 경향을 보였고, 더 많은 양의 물이 배출되었다. 또한, 쇄석:모래(80:20)의 혼합 다짐말뚝에서도 마찬가지로 쇄석:저회(80:20)와 유사한 경향을 보였다.

따라서, 쇄석:저회(80:20)의 혼합비에서 전단강도 특성과

표 9. 일정압력 하에서 시간경과에 따른 Δh

측압 (kPa)	시간 (hour)	Δh (cm)			
		저회(100)	쇄석(100)	쇄석(80)	쇄석(80)
				저회(20)	모래(20)
300	0	0	0	0	0
	2	0	1.5	0	0.5
	4	0.5	5	1.5	2
	8	1.5	11.5	3.3	5
	12	3	19.5	7	8
	18	6	25	11	12.5
	24	10	27.5	15	15.5
	36	14.5	31	20.5	19
	48	19	33	24	24
	60	21.5	34.5	29.5	31.5
	72	24.5	35	36	35
	84	28	35	41.5	40.5
	96	32.5	35.5	45	46.5
	120	35.5	36	48	49
	144	38.5	36	51	53
	168	39	36.5	53	54
192	40	36.5	53	54.5	

Clogging 현상의 저하를 파악할 수 있어 적정 혼합비로 사용될 수 있음을 표 9와 그림 15에서 알 수 있었다. 그림 16은 쇄석다짐말뚝과 쇄석과 저회 혼합다짐말뚝의 Clogging 현상을 비교한 전경이다. 쇄석다짐말뚝의 경우 점토입자가 쇄석의 공극을 파고들어 말뚝의 절반이상이 점성토로 덮여 가늘어진 다짐말뚝을 볼 수 있었다. 하지만, 쇄석과 저회 혼합다짐말뚝의 경우 점성토가 파고들지 못하여 말뚝 원래의 형태를 그대로 유지하고 있는 것을 알 수 있었고, 쇄석다짐말뚝보다 Clogging 현상이 매우 천천히 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 연약지반에 시공되어지는 쇄석다짐말뚝

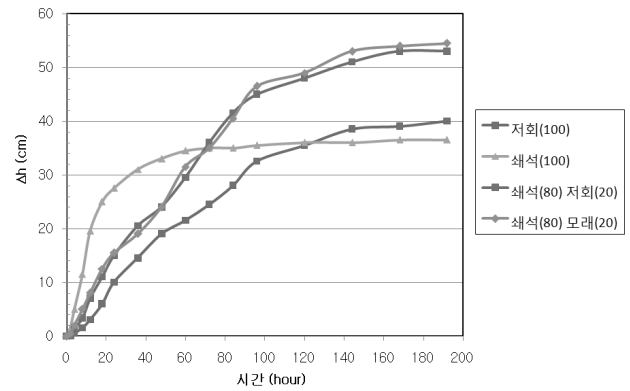
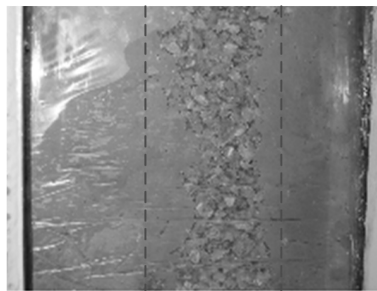


그림 15. 각 시료의 Clogging 시험 결과



(a) 쇄석다짐말뚝의 Clogging 현상



(b) 쇄석과 저회 혼합다짐말뚝의 Clogging 현상

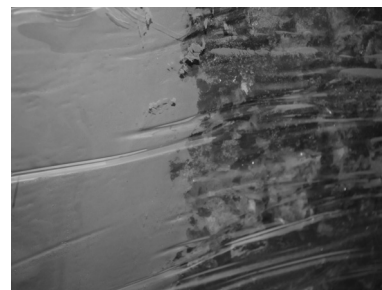


그림 16. Clogging 현상 비교

을 화력발전소 폐기물인 석탄회 중 재활용성이 낮은 저회와 혼합하여 채움으로써 말뚝체로부터 발생하는 Clogging 현상 억제와 다짐말뚝의 지지력을 높이기 위한 시공방법을 제시하기 위해, 쇄석과 저회의 혼합비 변화에 따른 대형직접전단시험 및 Clogging 시험을 실시하여 비교·분석하였고, 그 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 다짐횟수에 따른 각 쇄석과 저회의 배합비별 밀도를 살펴보면 다짐횟수가 증가할수록 밀도가 증가하는 경향을 나타내는데, 다짐시험 결과 쇄석 100%에 비해 저회 100%의 다짐밀도가 크게 나타났고, 쇄석과 저회 혼합 다짐 말뚝에서는 쇄석:저회(80:20)의 밀도가 가장 크게 나타났다. 각 배합비별 다짐횟수는 약 55회가 가장 효율적인 것으로 나타나 다음에 실시한 대형직접전단시험 및 Clogging시험에서 다짐말뚝 형성시 층별 다짐횟수를 55회로 결정하였다.
- (2) 대형직접전단시험 결과 쇄석:저회의 혼합비가 80:20일 때 내부마찰각이 가장 크게 나타났으며 저회의 혼합비가 20%를 넘어가면 내부마찰각이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서, 저회의 혼합비가 20%일 때, 쇄석 공극에 적정비의 저회가 혼합됨으로 인해서 Interlocking 효과가 가장 크게 나타남을 확인 할 수 있었다.
- (3) Clogging시험 결과 쇄석 100% 다짐말뚝의 초기 투수능이 가장 크게 나타났으나 시간의 경과에 따라 Clogging 현상이 저회와 혼합한 다짐말뚝에 비하여 빠르게 일어나 쇄석간의 공극이 막히는 Clogging 현상이 나타났다.
- (4) 쇄석과 저회 혼합다짐말뚝의 일정 압력에 따른 Clogging 현상을 살펴 본 결과, 쇄석 100% 다짐말뚝보다 초기 투수능이 낮았으나 장기적인 투수능 현상을 보이며 투수되는 물의 양이 많은 경향을 보였고, Clogging 억제 효과가 우수함을 알 수 있었다.
- (5) 쇄석과 저회(80:20) 혼합에 따른 Clogging 현상과 쇄석과 모래(80:20)의 혼합다짐말뚝의 Clogging현상을 비교·분석 하였다. 각 혼합다짐말뚝의 Clogging 현상을 비교한 결과, 비슷한 성향을 보이며 거의 유사한 그래프를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 쇄석다짐말뚝의 경우, 점토입자가 쇄석의 공극을 파고들어 말뚝의 절반이상이 점성토로 덮여 가늘어진 다짐말뚝을 볼 수 있었다. 하지만, 쇄석과 저회 혼합다짐말뚝의 경우, 점성토가 파고들지 못하며 말뚝 원래의 형태를 그대로 유지하고 있는 것을 알 수 있었고, 쇄석다짐말뚝보다 Clogging 현상

이 매우 천천히 나타나는 것을 알 수 있었다.

- (6) 본 연구는 쇄석과 저회의 혼합다짐말뚝의 활용을 위한 기초연구로서 향후 현장의 시험시공 등을 통해 현장적 용성에 대한 검증이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 고용일, 김홍택, 박영호, 김대영 (2004), 연약지반 개량용 배수재의 Clogging현상에 관한 실험적 연구, 2004년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 181~188.
2. 김래현, 홍성진, 김재정, 최영민, 이우진 (2009), 꺾임이 발생한 연직배수재의 내부 막힘현상, 2009년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 729~736.
3. 김상규 (1995), 밴드드레인의 품질과 연약지반 개량효과와의 관련, 1995년 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 1.3~1.22.
4. 김종선, 최용기, 박종호, 우상백, 이인모 (2006), 점도 변화와 폐색 현상을 고려한 그라우트재의 침투 특성, 2006년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 414~423.
5. 신동훈 (2000), 필댐 축조용 암석재료의 대형직접전단시험, 2000년 학술발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 375~378.
6. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성춘 (2005), 대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I), 한국지반공학회 논문집, Vol. 21, No. 6, pp. 81~91.
7. 이인모, 김주현, Lakshmi, N. R. (2000), 폐색으로 인한 부직포의 투수능 저하 현상, 2000년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 481~488.
8. 이인모, 김형섭, 박광준 (1998), 흙/필터재의 막힘 현상에 대한 실험적 고찰, Fall '98 National Conference 논문집, 한국지반공학회, pp. 65~72.
9. 정승용, 한상재, 신현영, 김수삼 (2005), 현장조건을 고려한 연직배수재의 투수능 시험, 대한토목학회 논문집, Vol. 21, No. 5, pp. 313~321.
10. 천병식, 고용일, 송경율, 이준기 (1999), 석탄회 자원의 채움재로서의 활용에 관한 연구, 1999년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 513~520.
11. 천병식, 고용일, 오민열, 권형석 (1990), 산업폐기물로 발생되는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, Vol. 10, No. 1, pp. 115~123.
12. 천병식, 정현철 (2002), 모래다짐말뚝의 모래대체재로서 등슬래그의 활용, 한국지반공학회 논문집, Vol. 18, No. 5, pp. 195~207.
13. 한국수자원공사 (1999), 댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화 방안 연구, 연구보고서, 한국수자원연구소, pp. 34~42.
14. 한국해양연구원 (2001), 모래다짐말뚝과 쇄석말뚝의 설계 및 시공지침서, 해양수산부, pp. 42~62.
15. 한봉수, 김용인, 김홍석, 장연수 (2003), 동수경사비 시험에 의한 토목섬유배수재의 장기막힘 특성, 2003년 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 3218~3222.
16. Mlynarek, J., Bogumil Lewandowski, J., Rollin, AndréL and Bolduc, G. (1991), Soil-geotextile System Interaction, Geotextiles and Geomembranes, Poland, Vol. 10, No. 2, pp. 161~176.

(접수일: 2009. 12. 1 심사일: 2009. 12. 10 심사완료일: 2009. 12. 31)