

도로공사 이수식 쉴드 TBM 굴착토 및 필터케이크 재활용방안 연구

남성민* · 박서영 · 안병철

정회원, 현대건설(주) 토목사업본부 책임매니저

A study for recycling plan of excavated soil and filter cake of slurry shield TBM for road construction

Sung-min Nam* · Seo-young Park · Byung-cheol Ahn

Senior Manager, Infrastructure Division, Hyundai Engineering & Construction

*Corresponding Author : Sung-min Nam, namsm@hdec.co.kr

Abstract

In order to excavate underground tunnel most safely such as Han river, the slurry shield TBM method is applied to cope with face of high water pressure for many metro projects. In downtown subway project most of excavated soil is discharged externally whereas in road construction excavated soil is used as filling materials so it becomes important factor for success of the project. After excavated soil, weathered rock and soft rock are discharged with bentonite through discharge pipe to slurry treatment plant then those soils are separated in separation plant according to those size. Fine grained soil has been discarded together with filter cake but it is not toxic and can be mixed with coarse aggregate in proper ratio so this study is performed to find use of qualified filling material to meet quality standard. Therefore, in this study, legal standards and quality standards for the utilization of excavated soil of the slurry shield TBM method were examined and test was conducted to derive recycling way for filter cake and aggregate. And a plan for using it as a filling material for road construction was derived. Because bentonite is a clay composed of montmorillonite, and the excavated soil in the tunnel is also non-toxic, disposal of this material can waste social cost so it is expected to be helpful in the underground space development project that carries out the TBM project by recycling it as a valuable resource.

Keywords: Filter cake (bentonite) recycling, Slurry TBM excavated soil recycling

초 록

한강과 같은 하저지반을 안전하게 굴착하기 위해서는 고수압 막장면에 대응할 수 있는 이수식 쉴드 TBM 공법을 적용한다. 이수식 쉴드 TBM 공법은 지하철 프로젝트에 널리

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
24(6)599-615(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.599>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received October 11, 2022

Revised October 27, 2022

Accepted October 27, 2022



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

활용되어 왔는데 도심지 지하철 공사는 지하에서 연결되기 때문에 굴착토를 대부분 전량 사토해왔으며 필터케이크(벤토나이트)도 폐기물처리를 했다. 이와 달리 도로공사는 절성토의 최적화를 위해 굴착되어 나온 토석을 외부로 반출하는 것이 아니고 대부분 성토재로 활용하는 특징이 있어 굴착토의 활용방안이 프로젝트 성공의 중요한 요소가 된다. 이수식 쉴드 TBM 공법에서 굴착토는 이수재로 사용하는 벤토나이트와 굴착된 토사, 풍화암, 연경암 등이 섞여서 배니관을 통해 이수처리플랜트로 운송되면 이수처리플랜트에서 처리과정을 거쳐 크기별로 분리 배출된다. 이러한 굴착토 중 세립질의 토사는 필터케이크와 함께 폐기되어 왔으나 그 성분에 독성이 없고 조립토와 적정 비율로 혼합하여 사용하면 성토재의 품질기준을 만족할 수 있어 그 활용방안에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구는 이수식 쉴드 TBM 공법의 굴착토의 활용에 있어 제도적·기술적 기준을 고찰하여 필터케이크와 골재를 도로공사의 성토재로 활용하는 방안을 도출하였다. 벤토나이트는 몬모릴로나이트로 구성된 점토이며 터널 원지반의 굴착토 또한 독성이 없는 상태로 이를 폐기물 처리하는 것은 사회적 비용이 낭비될 수 있기에 오히려 귀중한 자원으로 재활용하여 향후 이수식 쉴드 TBM 프로젝트를 수행하는 지하공간 개발사업에 도움이 되고자 기대한다.

주요어: 필터케이크(벤토나이트) 재활용, 이수식 쉴드 TBM 굴착토 재활용

1. 서론

이수식 쉴드 TBM은 이수를 활용하여 고수압의 막장면에 대응하며 굴착을 할 수 있는 가장 안전한 공법으로 지상의 이수처리플랜트까지 이수과 함께 굴착된 토사를 배니관을 통해 압송한 후 이수처리 플랜트 내의 Separation Plant를 통하여 골재를 크기별로 분리 배출한다. 이 때 분리 배출되는 굴착토의 일부는 함수비가 높아 필터프레스를 통해 물과 필터케이크로 분리하는데, 대부분의 현장에서 필터케이크를 폐기물 처리하고 있다. 벤토나이트는 몬모릴로나이트로 구성된 점토이며 굴착되는 토사 또한 원지반에서 굴착되어 나온 무독성의 재료들이다. 지하로만 연결되는 지하철은 굴착토에 대한 활용처가 없어 사토해야 하나 도로공사는 절토와 성토가 동시에 진행되는 공사가 많기 때문에 굴착토를 성토재로 활용할 수가 있다.

TBM의 단면은 점차 대형화되고 있는 추세로 국내 최초로 도로공사에 대단면 이수식 쉴드 TBM 공법을 적용한 한강터널공사가 진행되고 있다. 한강터널은 굴착단면 크기가 14.01 m의 대단면으로 굴착되는 토사의 양이 약 87만 m³에 이르며 이는 난지도 하늘공원의 약 1/10에 해당하는 상당한 규모이다. 이러한 방대한 물량의 토사를 성토재로 활용하는 방안은 프로젝트의 성패를 좌우하는 중요한 요소가 될 수 있다.

이수식 쉴드 TBM의 굴착토를 재활용하는 방안을 연구하기 위해 제도적·기술적 고찰을 수행하였다. 이에 따라 관련 규정을 살펴보고 품질기준을 고찰한 결과 성토재로 해당 건설공사에 사용할 경우 일정 시험기준을 만족하면 법적으로는 문제가 없다고 판명되었다. 건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률, 폐기물 관리법, 토양환경보전법 등에 의하면 “함수비가 일정 수준(70%) 이하면서 중금속 및 독성이 없다”는 품질시험을 만족하면 건설공사의 성토재로 활용이 가능하다. 또한 필터케이크와 골재를 적정 비율로 섞어서 만든 성토재료를 도로공사의 노체, 노상에 사용할 수 있는지를 판단하기 위한 품질 시험도 수행 하였다. 품질시험 결과 건설공사에서 활용할 수 있는

근거를 마련할 수 있었고, 이에 양질의 굴착토가 폐기물로 낭비될 수 있는 사회적 비용을 절감하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 이수식 쉴드 TBM의 이수처리방법

본 연구의 이수식 쉴드 TBM의 이수처리설비에 대한 개요도를 Fig. 1에 정리하였다. 이수(Slurry)가 압송펌프를 통해 송니 배관을 따라 터널 내 TBM 장비로 들어가면 커터헤드가 굴착한 토사와 암반과 섞여서 다시 배관을 따라 이수처리설비로 되돌아오는 순환을 반복한다. 이때 이수와 함께 들어온 굴착토를 이수처리 설비가 이수와 굴착토로 분리 하여 이수는 다시 터널 내 TBM으로 보내는 방식이며 굴착토는 이수처리설비를 통해 지상으로 분리되어 배출 된다.

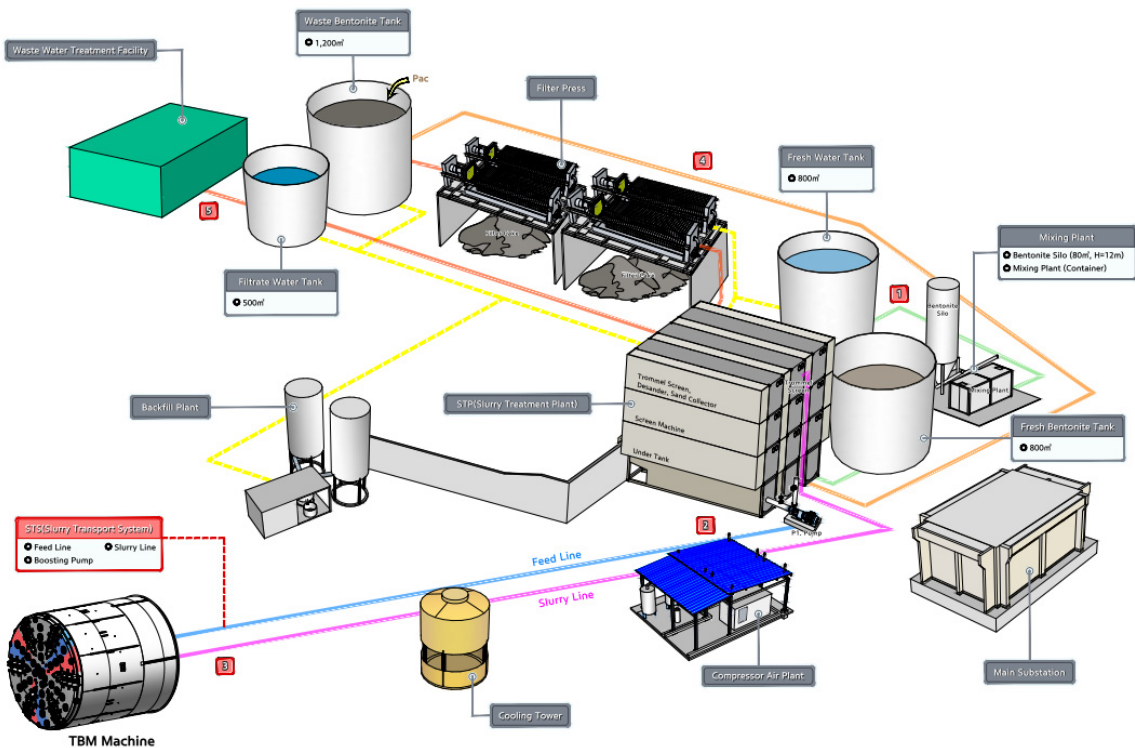


Fig. 1. Conceptual lay-out of slurry treatment plant for slurry shield TBM

이수처리 설비는 굴착토와 이수를 분리하는 설비와 이수를 제조하는 설비로 구성되어 있으며 부속설비로 필터 프레스와 이수 유송 설비가 있는데 이에 대한 내용을 Table 1에 기술하였다.

Table 1. Slurry treatment plant components

Description		Components
Slurry treatment plant	Separation plant	<ul style="list-style-type: none"> • 3~4 floors container type • Plant to separate gravel and sand from slurry
	Mixing plant	<ul style="list-style-type: none"> • Mixer, Bentonite silo, Pump system
	Filter press	<ul style="list-style-type: none"> • 4 filter presses with platform and access • Facility to separate water and filter cake from discarded bentonite tank
	Tanks	<ul style="list-style-type: none"> • Fresh bentonite tank, Discarded tank, Water tank, Regulation tank
Slurry transportation system		<ul style="list-style-type: none"> • Slurry transportation system with feeding and discharging pipes • Booster pumps (P₀, P₁, P₂, Relay pump) • Fitting and valves

이수처리 설비를 통해 배출되는 굴착토는 굵은 골재와 잔골재로 구분되어 배출되는데 이수처리설비의 스크린 망과 원심 분리하는 사이클론의 크기에 따라 조절할 수 있다. 중앙 배출구로 굵은 골재가 배출되고 양측 배출구로 잔골재가 배출되는 시스템으로 이수처리설비 운영현황을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

**Fig. 2.** Excavated materials after separation plant

배출되는 굴착토의 양이 상당할 경우 컨베이어 벨트를 설치하여 굴착토가 쌓이는 높이를 높게 할 수도 있다.

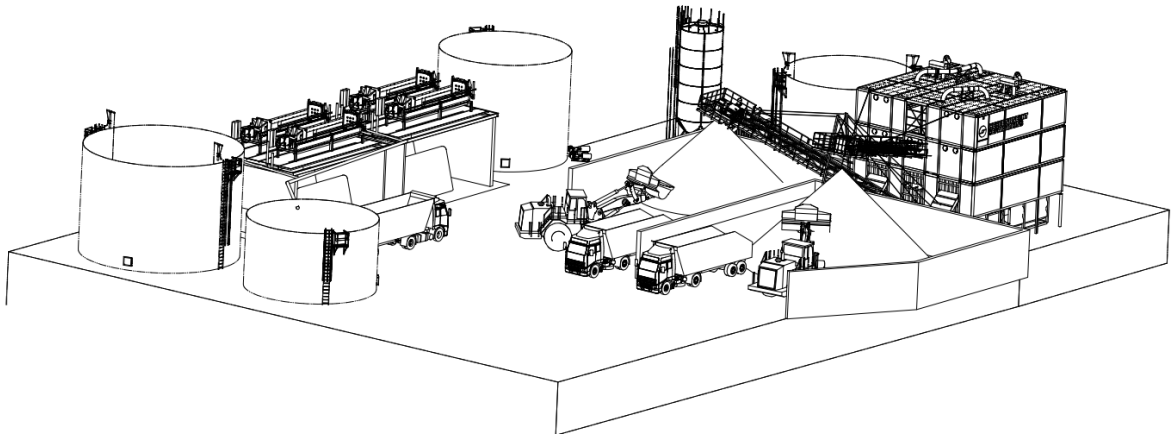


Fig. 3. STP components conceptual drawing

이때 잔골재보다 더 작고 함수비가 높은 미립분(Sand content)은 여과되어 계속 이수에 남아 순환하는데 일정 농도 이상이 쌓이면 이수의 품질이 저하되어 제 기능을 발휘하지 못하기 때문에 이수를 교체하여야 한다. 버려지는 이수는 페벤토나이트, 미세입자, 물 등으로 구성되어 있어 이를 분리하는 설비인 필터프레스를 통하여 처리한다. 필터프레스를 통해 탈수된 물은 오폐수처리 설비 압송되고 탈수가 진행된 벤토나이트와 미립분은 필터케이크의 형태로 배출된다(Fig. 4).

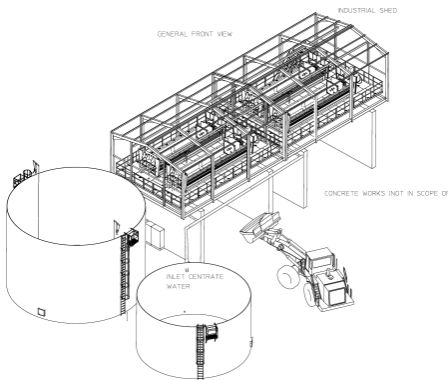


Fig. 4. Filter press conceptual drawing and picture of installation

이수처리설비를 통해 배출된 굴착토는 성토재로 활용되거나 외부 사토(타공구, 매립지 등)로 반출된다. 굴착토 중 함수비가 높고 세립질의 토사는 필터프레스로 들어가서 탈수과정을 거쳐 필터케이크의 형태로 배출되는데 폐기물로 반출된다. 이 필터케이크를 굴착토, 순환골재 등과 섞어서 성토재로 활용하는 방안을 연구하였다.

3. 이수식 실드 TBM 굴착토 및 필터케이크(벤토나이트) 재활용을 위한 고찰

3.1 선행연구 고찰

건설폐기물과 벤토나이트에 대한 재활용 방안의 선행연구에 대해 살펴보았다. Kim (2004)은 폐벤토나이트 분말의 소성 및 냉각조건에 따른 모르터의 압축강도 발현특성에 관한 연구에서 폐벤토나이트 분말이 포졸란 반응을 하므로 콘크리트의 재료로 사용이 가능함을 연구하였으며 Oh and Kim (2007)은 소성가공한 폐벤토나이트 분말의 최대 입자크기에 따른 모르터의 물성에 관한 연구를 통해 벤토나이트 안정액이 폐기되는 건설현장에서 발생하는 폐벤토나이트를 수집하여 분말을 사용한 모르터의 물성을 검토하였다. Kim and Chung (2012)은 건설폐기물 재활용 활성화 방안에 관한 연구에서 환경자원공사의 자료를 통해 건설폐기물이 도로보조기층용, 콘크리트 제품 제조용, 채움재용, 수평배수층, 성토재 등으로 활용되고 있음을 제시하고 있다(Table 2).

Table 2. Advance research review

No	Year	Author	Advance research contents
1	2004	Hyo-Youl Kim	<ul style="list-style-type: none"> • The study on the compressive strength properties of mortar using discarded bentonite powder by the cooling method after heat treatment • Recycling discarded bentonite powder as concrete materials
2	2007	Sang-Gyun Oh Hyo-Youl Kim	<ul style="list-style-type: none"> • The study on properties of mortar using heat-treatment discarded bentonite powder by particle size • Test and research with collection of bentonite from construction site
3	2012	Young-Jun Kim Myung-Hee Chung	<ul style="list-style-type: none"> • Study on the recycling of the construction wastes and reformation of the system • Proposal for recycling way of used construction material

선행연구 고찰 결과 이수식 실드 TBM의 필터케이크와 굴착토의 재활용 방안에 대해 연구한 자료를 찾기 어려웠으며 본 연구를 통해 재활용 방안에 대한 근거가 마련된다면 향후 점차 증가하는 지하공간 개발 사업에 도움이 될 것으로 기대할 수 있다.

3.2 해외연구 및 해외사례 고찰

스위스의 Gotthard Base Tunnel은 세계에서 가장 긴 철도 전용 터널(약 57 km)로 13.3백만 m³의 굴착암이 발생하는 초대형 프로젝트이다. 착공 전부터 굴착된 토석의 활용방안이 중요한 이슈로 부각되었기에 환경적으로 피해가 가장 적으면서 경제성을 고려한 최적의 자재 관리 계획이 준비되었다. 자재 관리를 위해 Fig. 5와 같이 대규모 운송시스템과 골재분리 시스템을 구비하여 수십 킬로미터의 거리를 컨베이어 벨트와 먹차(Muck Car) 등을 활용하여 분리시스템으로 운송한 후 골재 사이즈 별로 운송하여 분리하는 방식으로 굴착은 TBM 장비를 활용하여 수행하였다(Matthias, 2002).

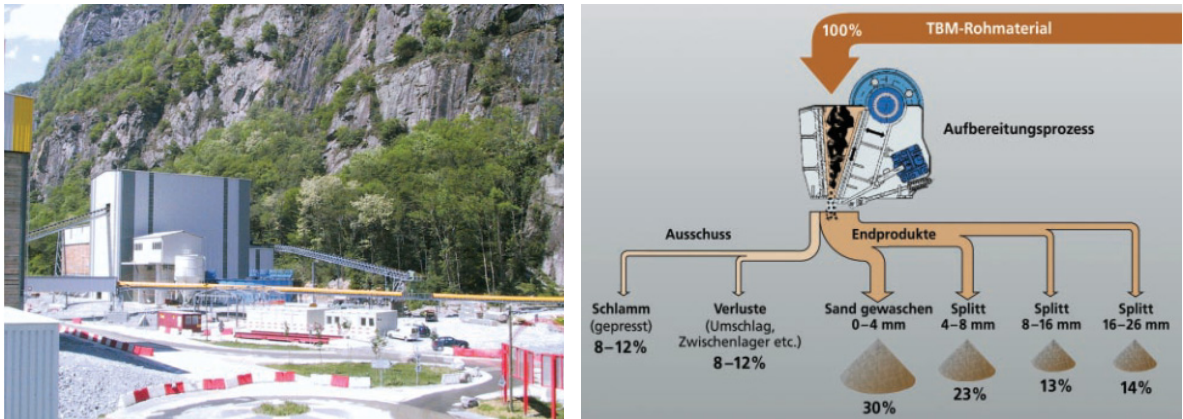


Fig. 5. Material management system with separation plant (alp-transit congress)

최근 필터케이크의 중금속 등을 제거하고 재활용하는 방안에 대한 연구가 생명과학 국제회의(Xhaferaj et al., 2020)에서 발표되었는데 다양한 중금속 침출방안을 통해 필터케이크가 폐기물로 버려지는 환경문제를 해결하는 방안이 제시되었다.

이탈리아는 알프스 산과 아펜니노 산맥 등을 통과하는 터널이 많아 TBM장비로 굴착되어 나온 토석을 콘크리트의 재료로 재활용하는 연구가 2011년도에는 Department of Land, Environment and Geotechnology Engineering에 의해서 American Journal of Environmental Sciences에 “Main Aspects of Tunnel Muck Recycling” 라는 주제로 발표 되었고(Bellopede et al., 2011), 2012년도에는 이탈리아 Department of Territorial Engineering 와 환경부 등에 의해 또 한번 “An Applied Study on the Debris Recycling in Tunnelling” 주제로 발표 되었다 (Oreste and Castellano, 2012). TBM 터널에서 나온 토석을 숏크리트와 콘크리트의 골재원으로 활용하는 방안이 연구되었고 미립분, 모래, 골재 등의 최적 배합비 등이 제시되었다.

3.3 제도적 기준 고찰

이수식 쉴드 TBM의 벤토나이트와 같이 배출되는 필터케이크를 성토재 등으로 재활용하기 위한 관련 규정을 찾아보면 Table 3과 같이 정리할 수 있다. 건설폐기물의 재활용을 촉진하는 법률을 살펴보면 재활용이 가능한 폐기물에 대해 정의하고 있고 재활용을 어떤 용도로 사용해야 하는지 상세히 정의해주고 있다. 건설폐기물 처리 등에 관한 지침과 건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률을 통해 이수처리플랜트의 굴착토와 필터케이크가 건설폐토 석과 건설오니 또는 건설폐토석으로 분류됨을 알 수 있으며 폐기물관리법, 환경분야 시험 등에 관한 법률, 토양환경보전법을 통해 건설폐기물 재활용을 위한 제한조건과 시험기준 등 기술적인 부분을 알 수 있어 자세히 기술하고자 한다.

Table 3. Relevant regulation and act for recycling of excavated soil and bentonite (filter cake)

Related law		Location	Detail
Manual on treatment of construction waste disposal ^{a)}	Ministry of environment regulations	II. Clause	Types and classification system of construction waste
Construction waste recycling promotion act ^{b)}	Enforcement decree	Table 1	Kinds of construction wastes (10. Construction sludge, 16. Discarded construction aggregate)
	Enforcement decree	Article 4	Purposes of reuse of recycled aggregate
	Rule	Table 1-2	Standards and methods for the discharge, collection, transportation, storage, and interim treatment of construction wastes
Wastes control act ^{c)}	Rule	Table 4-2	Detailed classification by type of recycling of waste
		Table 4-3	51-02-05 construction sludge recycling type
		Article 2-1	[attached Table 1] Hazardous chemicals standard in designated wastes
Environmental testing and inspection act ^{c)}	Act	Article 7,9	Official test standards for environmental contamination (the wastes control act Article 2-1, soil environment conservation act Article 2-2)
Soil environment conservation act ^{b)}	Rule	Table 3	Risk assessment for soil contamination

a) <http://www.codil.or.kr>, CODIL

b) Enforcement decree, <http://www.law.go.kr>, Korean Law Information Center

c) Rule, <http://www.law.go.kr>, Korean Law Information Center

Table 4를 참고하면 건설폐기물 처리등에 관한 업무처리지침에 의한 건설폐기물의 분류 및 처리방법이 명시되어 있으며 이수처리플랜트와 필터프레스를 통해 배출되는 벤토나이트 혼합물 등은 건설오니로 분류될 수 있으며 토사와 섞여 배출되는 경우는 건설폐토석으로 분류가 가능하다. 이수처리플랜트에서 Separation plant를 통해 배출되는 굴착토는 건설폐기물과 혼합되어 발생하는 것 중 분리 선별된 흙, 모래, 자갈이므로 건설폐토석으로 분류가 가능하다.

Table 4. Manual on treatment of construction waste disposal II. Classification and treatment methods of construction wastes

Description	Contents
Discarded construction aggregate	<ul style="list-style-type: none"> Excluding contaminated soil subject to the soil environment conservation act Soil, sand, and gravel that are separated from mixing with construction waste Gravel, soil, sand in the railroad section
Construction sludge	<ul style="list-style-type: none"> Bentonite compound, slime from soft ground stability works A mixture of soil and construction sludge and discharged as construction sludge can be classified as construction aggregate

건설오니 또는 건설폐토석으로 분류되는 재료는 건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률 시행령 제4조에 명시된 Table 5와 같은 용도로 재활용이 가능하므로 가항 건설공사의 성토용 또는 복토용으로 사용이 가능하다고 판명된다. 이에 건설공사의 성토용으로 사용할 경우 기술적으로 품질기준을 만족한다면 법적으로는 저촉되는 바가 없는 것으로 검토되었다. 다만 필터프레스와 같은 건설폐기물처리시설 사용신고에 대한 지방자치단체의 관계 법령의 승인을 받아야 한다.

Table 5. Enforcement decree of the construction waste recycling promotion act Article 4 (purposes of reuse of recycled aggregate)

Clause	Approved usage for recycling
GA	For the purpose of filling or backfilling for construction work authorized or permitted under the relevant statutes and regulations;
NA	For the purposes provided in subparagraph 1 MA (backfilling materials among waste disposal facilities) or BA (filling materials for cut and cover area)
DA	For the purpose of filling materials to improve farmland as provided in subparagraph 2 of Article 3-2 of the enforcement decree of the farmland act

건설오니를 재활용하고자 할 경우 수분 함량이 70% 이하가 되어야 하며 일반토사 또는 순환토사를 부피기준으로 50% 이상 혼합하여 재활용할 수 있다. 건설오니와 건설폐토석의 재활용-용도로는 폐기물 관리법 시행규칙에 따라 토목건축공사나 공유수면 등의 성토재, 복토재, 도로기층재, 채움재 및 농경지의 성토재로 사용이 가능하다. 또 시멘트, 콘크리트 및 레미콘, 아스팔트, 아스콘, 고화제 등의 비금속광물제품을 제조하는 유형에도 사용이 가능하다. 제도적 관점에서 고찰한 결과 이수처리플랜트에서 배출되는 굴착토는 건설폐토석으로 볼 수 있으며 벤토나이트를 다량 함유한 필터케이크는 건설오니 또는 건설폐토석(토사와 섞여 배출될 경우)으로 볼 수 있다. 건설오니와 건설폐토석은 관계법령에 따라 일정기준을 만족하면 도로 성토재, 농지개량용 성토재로 재활용이 가능함을 알 수 있다. 사례를 조사해본 결과 토양오염토 정화처리 현장에서 배출된 토양 슬러지를 시멘트 제작의 부원료로 활용하였으며(Wookwangdev Co., Ltd., 2020) 경인 지역 지중화 공사에서 쉘드 TBM 및 슬러리월 공법에 사용된 굴착토를 관련 인허가 및 품질시험을 거쳐 경인 아라뱃길 성토재로 재활용한 사례가 있다(KEPCO, 2010).

3.4 기술적 기준 고찰

필터케이크 형태로 배출되는 페벤토나이트 등을 재활용하기 위해서는 오염물질이 없어야 하며 노상 또는 노체에 해당하는 시험기준을 만족하여야 한다. 먼저 오염관련 품질시험 기준을 살펴보면 토양환경보전법 시행규칙에 토양오염우려 기준이 지역별로 명시되어 있다. 도로공사의 성토재로 활용하기 위해서는 3지역의 오염기준을 만족하여야 하며 그 기준을 Table 6에 기술하였다.

Table 6. Risk assessment for soil contamination (rule of the soil environment conservation act)

Material	Contamination criteria (unit: mg/kg, for PCDD/Fs: pg-TEQ/g)		
	District 1	District 2	District 3
1. Cadmium (Cd)	4	10	60
2. Copper (Cu)	150	500	2,000
3. Arsenic (As)	25	50	200
4. Mercury (Hg)	4	10	20
5. Lead (Pb)	200	400	700
6. Chromium (+6)	5	15	40
7. Zinc (Zn)	300	600	2,000
8. Nickel (Ni)	100	200	500
9. Fluorine (F)	400	400	800
10. Organic P complex	10	10	30
11. PCB (polychlorinated biphenyl)	1	4	12
12. Cyanide	2	2	120
13. Phenol	4	4	20
14. Benzene	1	1	3
15. Toluene	20	20	60
16. Ethyl benzene	50	50	340
17. Xylene	15	15	45
18. TPH (total petroleum hydrocarbon)	500	800	2,000
19. TCE (trichloroethylene)	8	8	40
20. PCE (tetrachloroethylene)	4	4	25
21. Benzo[a]pyrene	0.7	2	7
22. 1,2-Dichloroethane	5	7	70
23. Dioxin (include purin)	160	340	1,000

1지역은 공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률에 따른 지목이 전·답·과수원·목장용지·광천지·대(공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령 제58조 제8호 가목 중 주거의 용도로 사용되는 부지만 해당)·학교용지·구거(溝渠)·양어장·공원·사적지·묘지인 지역과 어린이 놀이시설 안전관리법 제2조 제2호에 따른 어린이 놀이 시설(실외에 설치된 경우에만 적용한다) 부지를 말한다. 2지역은 공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률에 따른 지목이 임야·염전·대(1지역에 해당하는 부지 외의 모든 대)·창고용지·하천·유지·수도용지·체육용지·유원지·종교용지 및 잡종지(공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령 제58조 제28호 가목 또는 바목에 해당하는 부지만 해당)인 지역을 말한다. 3지역은 공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률에 따른 지목이 공장용지·주차장·주유소용지·도로·철도용지·제방·잡종지(2지역에 해당하는 부지 외의 모든 잡종지)인 지역과 국방·군사시설 사업에 관한 법률 제2조 제1호 가목부터 마목까지에서 규정한 국방·군사시설 부지를 말한다. 3가지 종류의 지역 구분에 따라 오염기준이 다르며 해당 오염기준치 이하의 재료만 재활용이 가능하므로 사용 전 공인기관에 해당 시험을 의뢰하여 검사를 받아야 한다.

또한 토양환경보전법에 의한 토양오염우려기준 외에 폐기물관리법 시행규칙에서 지정한 지정폐기물에 함유

된 유해물질로 구리, 비소, 수은, 카드뮴, 6가 크롬 화합물 등 중금속과 기름, 방사성물질, 석면 등이 있으며 기준치 이하여야 사용이 가능한 데 Table 7에 그 항목과 기준치를 기술하였다.

Table 7. Hazardous chemicals standard in designated waste (rule of wastes control act [attached Table 1])

Category	Unit	Criteria for containing	Remark
Lead (Pb)	mg/L	More than 3	-
Copper (Cu)	mg/L	More than 3	-
Arsenic (As)	mg/L	More than 1.5	-
Mercury (Hg)	mg/L	More than 0.005	-
Cadmium (Cd)	mg/L	More than 0.3	-
Chromium (+6)	mg/L	More than 1.5	-
Cyanide	mg/L	More than 1	-
Total oil	% (wt/wt)	More than 5	-
TCE	mg/L	More than 0.3	Trichloroethylene
PCE	mg/L	More than 0.1	Tetrachloroethylene
Organic P complex	mg/L	More than 1	-

또한 수분함량 70% 이하로 건조된 토사만 재활용에 사용이 가능하므로 흙의 함수량 시험방법[KS F 2306]에 의거 시험을 실시하여 만족할 경우 사용하고 만족하지 못할 경우 탈수설비 또는 건조시설을 통해 수분함량을 만족해야 한다.

성토용 재료에 따른 품질시험 기준으로 고속도로 건설재료 품질기준 전문에 따르면 노상, 노체의 품질기준은 Table 8과 같다.

Table 8. Expressway construction materials quality standard

Description	Unit	Sub grade		Sub base	Backfill		
		Rock fill	Soil		SB-1 (H3.5 m below)	Good earth (H3.5 m above)	
Material	Maximum size	mm	600 below	300 below	100 below	75 below	100 below
	Modified CBR	%	-	2.5 above	10 above	50 above	10 above
	Sieve analysis (5 mm)	%	-	-	25~100	30~65	25~100
	Sieve analysis (0.08 mm)	%	-	-	0~25	0~8	0~15
Standard	Plasticity index	%	-	-	10 below	6 below	10 below
	Liquid limit	%	-	-	-	25 below	-
	Abrasion loss	%	-	-	-	50 below	-
	Sand equivalent	%	-	-	-	25 above	-

Table 8. Expressway construction materials quality standard (continued)

Description		Unit	Sub grade		Sub base	Backfill			
			Rock fill	Soil		SB-1 (H3.5 m below)	Good earth (H3.5 m above)		
Const- ruction Stand- ard	1st bed thickness of after compaction		cm	60 below	30 below	20 below	20 below	20 below	
	Method of compaction test		-	-	A, B method	C, D, E method	D, E method	D, E method	
	Compaction ratio		%	-	90 above	95 above	95 above	95 above	
	Field density test	Relative density (Dr)	%	70 above	-	-	-	-	
	Grain size distribution	Coefficient of uniformity (Cu)	-	G: Cu ≥ 4 S: Cu ≥ 6	-	-	-	-	
		Coefficient of curvature (Cg)	-	1 < Cg < 3	-	-	-	-	
	P B T	AP pavement	Settlement	cm	0.125	0.25	0.25	0.25	0.25
			Bearing capacity factor (K30)	kgf/cm ³	20 above	15 above	20 above	30 above	15 above
		MN/m ³		200 above	150 above	200 above	300 above	150 above	
		Cement pavement	Settlement	cm	0.125	0.125	0.125	0.25	0.25
Bearing capacity factor (K30)			kgf/cm ³	20 above	10 above	15 above	30 above	15 above	
		MN/m ³	200 above	100 above	150 above	300 above	150 above		
General standard for filling materials		General standard: LL <50%, Dry density >1.5 t/m ³ , PL <25%, Porosity <42%							

4. 건설폐기물 재활용을 위한 제도 및 시험결과 분석

건설오니 및 건설폐토석의 재활용을 위해서 Table 9와 같이 시험계획을 세웠으며 해당 시료에 대한 시험을 실시하였다. 시료는 벤토나이트(필터케이크)와 조립토를 1:5로 섞어서 만들었으며 일반토사, 이수처리플랜트에서 배출되는 굴착토 중 세척한 모래와 세척하지 않은 모래 총 3가지의 시료로 시험을 진행하였다.

Table 9. Test plan

Case	Mixed materials	Mixing ratio
A.	Bentonite (filter cake) + Common soil	1:5
B.	Bentonite (filter cake) + STP sand materials (non washed)	1:5
C.	Bentonite (filter cake) + STP sand materials (washed)	1:5

시험재료는 별내선 ○○공구 이수식 쉴드 TBM현장에서 Fig. 6과 같이 필터케이크와 굴착토의 샘플 채취하여 케이스 별로 시료를 제작 하였으며, 채취 당시 원지반 상태는 연암인 것으로 확인하였다.



Fig. 6. Collection of material samples from slurry shield TBM project

지정폐기물에 함유된 유해물질이 기준치 이하인지 확인하기 위한 시험결과를 Table 10에 나타내었는데 A, B, C 3가지 시료 모두 유해물질이 불검출 되었다. (재)한국환경수도연구원에서 시험을 수행하였고 시험환경은 실내 온도 20~23°C, 습도 15~25% 상태로 폐기물공정시험기준(국립환경과학원고시 제2017-54호)에 따른 시험방법을 따랐다.

Table 10. Test results for hazardous chemicals standard in designated wastes

Category	Unit	Criteria for containing	Filter cake (bentonite) mixed specimen		
			A. Common soil	B. STP sand (non-washed)	C. STP sand (washed)
Cadmium (Cd)	mg/L	More than 3	Not found	Not found	Not found
Copper (Cu)	mg/L	More than 3	Not found	Not found	Not found
Arsenic (As)	mg/L	More than 1.5	Not found	Not found	Not found
Mercury (Hg)	mg/L	More than 0.005	Not found	Not found	Not found
Cadmium (Cd)	mg/L	More than 0.3	Not found	Not found	Not found
Chromium (+6)	mg/L	More than 1.5	Not found	Not found	Not found
Cyanide	mg/L	More than 1	Not found	Not found	Not found
Oil	%	More than 5	Not found	Not found	Not found
TCE	mg/L	More than 0.3	Not found	Not found	Not found
PCE	mg/L	More than 0.1	Not found	Not found	Not found
Organic P complex	mg/L	More than 1	Not found	Not found	Not found

토양오염우려기준에 의한 시험결과는 Table 11에 나타내었으며 A, B, C 3가지 시료 모두 오염물질이 불검출되었거나 기준치 이하로 판명되었다. (재)한국환경수도연구원에서 시험을 수행하였으며 시험환경은 실내온도 20~23°C, 습도 15~25% 상태로 토양오염공정시험기준(국립환경과학원고시 제2018-53호)에 따른 시험방법을 따랐다.

Table 11. Test results for risk assessment for soil contamination

Description	Unit	Risk level	Filter cake (bentonite) mixed specimen		
		District 3	A. Common soil	B. STP sand (non-washed)	C. STP sand (washed)
Cadmium (Cd)	mg/kg	60	Not found	0.1	0.11
Copper (Cu)	mg/kg	2,000	22.2	37.7	50.6
Arsenic (As)	mg/kg	200	2.44	Not found	Not found
Mercury (Hg)	mg/kg	20	Not found	Not found	Not found
Lead (Pb)	mg/kg	700	6.6	Not found	Not found
Chromium (+6)	mg/kg	40	Not found	Not found	Not found
Zinc (Zn)	mg/kg	2,000	90.9	79.5	82.9
Nickel (Ni)	mg/kg	500	23	49.8	57.9
Fluorine (F)	mg/kg	800	762	724	789
Organic P complex	mg/kg	30	Not found	Not found	Not found
PCB (polychlorinated biphenyl)	mg/kg	12	Not found	Not found	Not found
Cyanide	mg/kg	120	Not found	Not found	Not found
Phenol	mg/kg	20	Not found	Not found	Not found
Benzene	mg/kg	3	Not found	Not found	Not found
Toluene	mg/kg	60	Not found	Not found	Not found
Ethyl benzene	mg/kg	340	Not found	Not found	Not found
Xylene	mg/kg	45	Not found	Not found	Not found
TPH (total petroleum hydrocarbon)	mg/kg	2,000	Not found	Not found	Not found
TCE (trichloroethylene)	mg/kg	40	Not found	Not found	Not found
PCE (tetrachloroethylene)	mg/kg	25	Not found	Not found	Not found
1,2-Dichloroethane	mg/kg	70	Not found	Not found	Not found
Benzo[a]pyrene	mg/kg	7	Not found	Not found	Not found

다음으로 고속도로 건설재료 품질기준을 만족하는지 확인하기 위해 시험을 실시하였으며 A, B시료를 가지고 시험을 하였다. B시료인 벤토나이트와 이수처리플랜트 비세척 조립토가 시험기준을 만족하면 세척 모래를 사용하는 C시료도 만족할 것으로 판단되기 때문이다. 또한 수분함량이 70% 이하여야 재활용이 가능하기 때문에 함수비 시험도 같이 병행하여 실시하였다. (주)건설표준시험원에서 시험을 수행하였으며 시험방법은 KS 기준을

따랐다. 시험결과는 Table 12에 기술하였으며 노상재료로 적합하다는 판정을 받았다.

Table 12. Test results for expressway construction materials quality standard and water contents

Category	Standard	Sub base	Filter cake (bentonite) mixed specimen				Remark	
			A. Common soil		B. STP sand (non-washed)			
			Test result	Analysis	Test result	Analysis		
Material	Maximum size	KS F 2302	100 mm below	19 mm	Satisfied	19 mm	Satisfied	-
	Modified CBR	KS F 2320	10 above	10.90%	Satisfied	13.40%	Satisfied	-
	Sieve analysis (5 mm)	-	25~100%	93.80%	Satisfied	97.80%	Satisfied	-
Standard	Sieve analysis (0.08 mm)	-	0~25%	22.20%	Satisfied	23.10%	Satisfied	-
	Plasticity index	-	10% below	Non plastic	Satisfied	Non plastic	Satisfied	-
Material	Liquid limit	-	50% below	22.80%	Satisfied	23.00%	Satisfied	-
	Plasticity limit	-	25% below	Non plastic	Satisfied	Non plastic	Satisfied	-
	Density	KS F 2308	-	2.676 g/cm ³	-	2.737 g/cm ³	-	-
Standard	Compaction (A)	Max. dry density	1.5 g/cm ³ above	1.918 g/cm ³	Satisfied	1.946 g/cm ³	Satisfied	-
		OMC	-	12.40%	-	12.20%	-	-
	Compaction (D)	Max. dry density	-	2.030 g/cm ³	-	2.057 g/cm ³	-	-
		OMC	-	10.10%	-	9.20%	-	-
Water contents	KS F 2306	-	9.40%	Satisfied	8.70%	Satisfied	Water content 70% below	

A, B시료를 만들어서 (주)건설시험표준원에 보낸 벤토나이트(필터케이크), 모래 혼합시료 사진을 Fig. 7에 나타내었다.

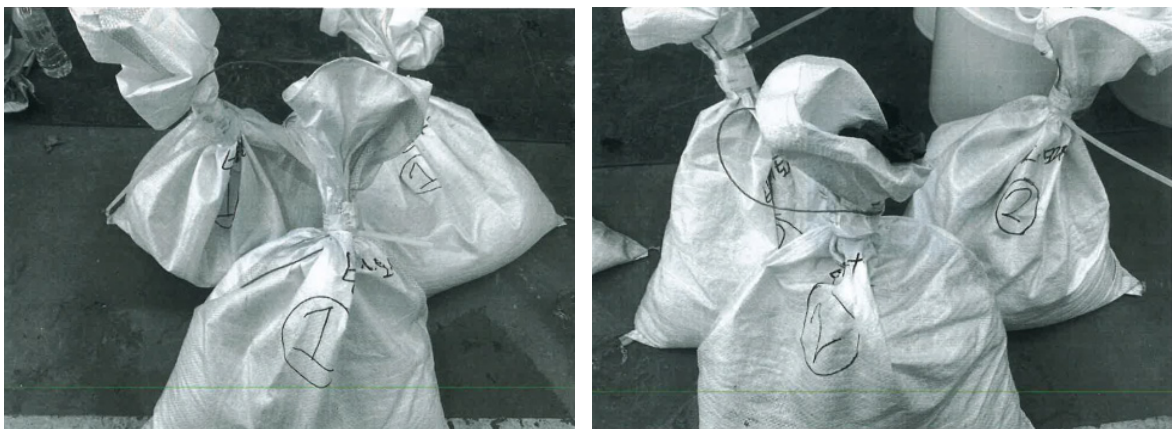


Fig. 7. Test samples for expressway construction materials quality standard and water contents

시험결과 노상재료로 적합한 판정과 성토재의 일반기준도 만족하였으며 수분함량도 8.7~9.4%수준이라 70% 이하를 충분히 만족하였다. 이로써 벤토나이트(필터케이크)와 굴착토는 오염물질이 거의 없으며 1:5로 혼합한 재료는 노상재료로 적합하다고 판명되었다. 이를 종합적으로 정리하여 Table 13에 기술하였다.

Table 13. Institutional · Technical analysis for recycling of construction wastes from TBM

Description	Standard	Detailed terms	Results
Institutional standard	Related act	Waste control act	Satisfied
		Soil environment conservation act	Satisfied
Technical standard	Related quality test	Risk assessment for soil contamination	Satisfied
		Hazardous chemicals standard in designated wastes	Satisfied
		Expressway construction materials quality standard	Satisfied
		Moisture content	Satisfied

5. 결론

본 연구에서는 이수식 쉘드 TBM의 굴착토와 필터케이크(페벤토나이트)의 재활용 방안에 대해 제도 및 기술적 분석을 시험을 통해 규명하였다. 제도적, 기술적 고찰 결과 관련 법규정을 만족하고 품질 기준도 만족하여 도로공사의 노상성토재로 재활용이 가능함을 연구하였으며 이에 향후 이수식 쉘드 TBM의 굴착토 및 벤토나이트의 재활용에 대한 근거를 마련하는데 기여하였다. 건설폐기물의 재활용을 통해 사회적 비용을 절감하고 민간건설기업의 ESG경영에 도움이 되길 기대한다.

1. 제도적 고찰 결과 굴착토와 필터케이크(페벤토나이트)는 환경부 예규(건설폐기물 처리 등에 관한 업무처리 지침)에 따라 건설오니 또는 건설폐토석으로 분류되며 건설오니 또는 건설폐토석은 건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률에 의거 관련법령에 따라 인가·허가된 건설공사의 성토재로 재활용이 가능한 것으로 분석되었다.
2. 기술적 고찰 결과 필터케이크(페벤토나이트)와 굴착토를 1:5로 혼합한 재료는 토양오염우려기준, 지정폐기물에 함유된 유해물질기준, 수분함량, 고속도로 건설재료 품질시험 등의 기준을 만족하여 도로공사의 노상재료 사용이 가능함을 판명하였다.
3. 한계점으로 필터케이크(페벤토나이트)와 굴착토의 1:5 배합비만을 시험하였기에 최적비율을 찾기 위한 향후 연구가 필요하며 굴착토가 원지반의 상태에 따라 상이하기 때문에 재활용을 위해서는 사용전 시험을 수시로 실시하여야 하는 점과 향후 필터케이크와 굴착토의 배합 재료를 성토한 후 노상 성토재료의 공학적 특성을 만족하는지 실증하기 위한 시험시공 및 평판재하 시험 등 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다.
4. 이러한 한계점에도 불구하고 이수식 쉘드 TBM의 필터케이크 재활용은 지금까지 연구가 거의 없었던 분야로 건설폐기물의 재활용을 통해 사회적·사업적인 비용을 절감하는데 기여하였다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 김포~파주 고속도로 한강터널 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

저자 기여도

남성민은 연구 개념 및 설계, 원고 작성을 하였고, 박서영은 데이터 수집, 분석, 해석을 하였으며 안병철은 원고를 검토하였다.

References

1. Bellopede, R., Brusco, F., Oreste, P., Pepino, M. (2011), "Main aspects of tunnel muck recycling", American Journal of Environmental Sciences, Vol. 7, No. 4, pp. 338-347.
2. KEPCO (2010), Application form of approval for construction waste treatment plant, Korea Electric Power.
3. Kim, H.Y. (2004), "The study on the compressive strength properties of mortar using discarded bentonite powder by the cooling method after heat treatment", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 4, No. 4, pp. 87-94.
4. Kim, Y.J., Chung, M.H. (2012), "Study on the recycling of the construction wastes and reformation of the system", Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, Vol. 20, No. 2, pp. 27-35.
5. Matthias, K. (2002), "Preparing the excavated Material at the Gotthard Base Tunnel", Proceedings of the 1st Alp-Transit Congress of the FGU, June 13, Thun, Switzerland, pp. 27-34.
6. Oh, S.G., Kim, H.Y. (2007), "The study on properties of mortar using heat-treatment discarded bentonite powder by particle size", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 23, No. 4, pp. 79-86.
7. Oreste, P., Castellano, M. (2012), "An applied study on the debris recycling in tunnelling", American Journal of Environmental Sciences, Vol. 8, No. 2, pp. 179-184.
8. Wookwangdev Co., Ltd. (2020), Waste treatment plan (○○ camp waste soil treatment project).
9. Xhaferaj, N., Peçuli, A., Shkurti, A., Kopali, A. (2020), "Recycling and recovery of hazardous inorganic constituents from filter cake waste", Online International Conference on Life Sciences (OICLS-20), pp. 52-57.