TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.34, No.1, 2024, pp.15-27
https://doi.org/10.7474/TUS.2024.34.1.015 ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

CASE STUDY

사용후핵연료 심층 처분장을 위한 국내외 굴착손상영역 사례연구

윤정환[1], 민기복[2*], 권상기[3], 송명규[4], 이승원[4], 고태영[5], 정호영[6], 신영진[7], 정재훈[7], 임주휘[8]

[1]서울대학교 에너지시스템공학부 석박사통합과정, [2]서울대학교 에너지시스템공학부 교수, [3]인하대학교 에너지자원공학과 교수, [4]한양대학교 자원환경공학과 교수, [5]강원대학교 에너지자원·산업공학부 에너지자원공학전공 조교수, [6]부경대학교 에너지자원공학과 조교수, [7]현대건설 기술연구원 책임연구원, [8]현대건설 기술연구원 연구원

Oversea & Domestic Case Studies on Excavation Damaged Zone for Deep Geological Repository for Spent Nuclear Fuel

Jeonghwan Yoon[1], Ki-Bok Min[2*], Sangki Kwon[3], Myung Kyu Song[4], Sean Seungwon Lee[4], Tae Young Ko[5], Hoyoung Jeong[6], Youngjin Shin[7], Jaehoon Jung[7], and Juhyi Yim[8]

[1]Ph.D Student, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University
[2]Professor, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University
[3]Professor, Department of Energy Resource Engineering, Inha University
[4]Professor, Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University
[5]Assistant Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University
[6]Assistant Professor, Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University
[7]Senior Researcher, R&D center, Hyundai Engineering and Construction
[8]Researcher, R&D center, Hyundai Engineering and Construction

***Corresponding author:** kbmin@snu.ac.kr

Received: December 6, 2023
Revised: December 15, 2023
Accepted: December 15, 2023

ABSTRACT

In this case study, detailed survey of the Excavation Damaged Zone (EDZ) evaluation for the deep geological repository for high level nuclear waste was conducted. Oversea and Domestic case studies were compiled and investigated. EDZ is considered a crucial factor in the performance assessment of spent fuel disposal, leading to numerous studies worldwide aiming to understand the characteristics of the EDZ and quantitatively assessment of its extent through field and laboratory tests at Underground Research Laboratory (URL) sites. To enhance the understanding of EDZ, this study begins with defining and exploring the history of EDZ, compiling factors influencing EDZ, and summarizing the impacts caused by EDZ. Subsequently, an analysis of EDZ and rock properties is performed, followed by presenting generalized outcomes, limitations drawn from previous research, and proposing future research directions.

Keywords: Excavation damaged zone, Spent nuclear fuel repository, Underground research laboratory

초록

본 사례연구에서는 사용후핵연료 처분장 건설을 위한 굴착손상영역(EDZ) 평가 및 국내외 실증연구사례를 정리하고 조사하였다. 굴착손상영역은 사용후핵연료 처분장의 성능평가에 중요한 요소로 간주되며, 국내외 여러 국가에서 지하 연구시설 현장 및 실험실 시험을 통해 굴착손상영역의 특성 파악 및 그 범위

를 정량적으로 판단하고자 하는 연구들이 수행되어왔다. 굴착손상영역에 대한 이해를 위하여 굴착손상영역의 정의, 역사를 시작으로 굴착손상영역에 영향을 주는 요인과 굴착손상영역으로 인한 영향을 정리하였다. 다음으로 굴착손상영역과 암반 특성에 관한 분석을 수행하였으며, 선행연구를 통해 도출한 일반화된 요약과 한계점, 향후 연구 방향을 제시하였다.

핵심어: 굴착손상영역, 사용후핵연료 처분장, 지하 연구 시설

1. 서 론

암반손상영역(Disturbed Rock Zone, DRZ)이란 굴착으로 인해 암반의 역학적, 열적, 수리적, 화학적 물성이 변화한 영역을 의미한다(Martino and Chandler, 2004). 이러한 영역은 주로 굴착 방법, 공동 형상, 공동 크기, 암석 강도 및 현지 응력 조건에 큰 영향을 받는다(Martin et al., 1999). 특히, 발파나 터널 보링 머신(Tunnel Boring Machine, TBM)과 같은 굴착 방법을 주로 고려하면, 암반 손상 영역보다는 굴착손상영역(EDZ, Excavation Damaged Zone)이라는 용어가 사용된다(Fairhurst, 1999, Stephansson, 1999). 굴착 전에 비해 응력이 크게 변한 지역을 교란(disturbance) 영역으로 정의하며, 손상(Damage)은 암석의 특성과 무결성이 감소한 보다 제한된 영역을 의미한다.

굴착손상영역은 특히 심도가 깊을수록 그리고 현지응력이 클수록 그 영향이 크게 나타나며, 지하공동 주변에 열, 수리, 역학적인 암반 물성에 심각한 영향을 미치게 된다(Malmgren et al., 2007). 지하 500 m에 건설되는 사용후핵연료 처분장과 같은 구조물에서의 구조적인 안정성은 중요하며, 굴착손상영역으로 인한 암반의 물성 변화는 사용후핵연료 처분장의 안정성에 크게 영향을 미치게 된다. Tsang et al.(2005)은 손상 영역에서의 새로운 균열의 발생 및 기존 균열의 성장으로 인해 암반의 투수 계수가 최대 수천 배 증가하는 것을 보고하였으며, 이러한 투수 계수의 변화는 사용후핵연료 처분장 주변의 지하수 유동에 영향을 미치게 되어 핵종 유출 등 사용후핵연료 처분장 안전성을 위협하는 잠재적인 위험 요소가 될 가능성이 크다. 또한, 암석의 열전도도, 열팽창계수, 그리고 비열과 같은 열적 물성의 변화는 처분시스템에서의 온도 분포와 완충재의 최대온도, 전반적으로 처분장 안전성 및 안정성에 영향을 미친다(Kwon and Cho, 2008).

이처럼 지하 심부에 건설된 구조물에서 굴착손상영역으로 인한 암석의 특성 변화는 구조물의 안정성에 영향을 미치며, 이러한 이유로 미국, 일본, 스웨덴, 캐나다, 프랑스, 스위스, 벨기에 등 여러 국가에서는 지하 연구 시설(Underground Research Laboratory, URL)을 건설하여 관련 연구를 수행하였다.(Sugihara et al., 1993, Sato et al., 2000, Bäckblom and Martin, 1999, Emsley et al., 1997, Bossart et al., 2002, Bossart et al., 2004, Tsang et al., 2005). 이러한 시설들에서 굴착손상영역의 특성을 평가하고 그 범위를 정량적으로 평가하며, 굴착손상영역의 발생 메커니즘을 이해하기 위한 현장 및 실험실 실험이 수행되었다.

본 사례연구에서는 굴착손상영역의 정의 및 역사를 살펴보고 굴착손상영역과 관련된 실증 연구 사례를 정리하며 굴착 방법 및 암석 특성과 같은 요인, 그중에서 탄성파 속도의 변화를 중점적으로 굴착손상영역의 범위 및 특성을 분석하였다.

2. 굴착손상영역 정의와 역사

2.1 굴착손상영역의 정의

굴착손상영역(Excavation Damaged Zone, EDZ)은 터널 굴착과 같은 인공적인 활동으로 인해 주변 암석의 초기 특성이 변경되

는 구간으로 정의된다. Fig. 1은 굴착손상영역 형성의 일반적인 개념을 모식도로 나타냈다. 발파나 기타 굴착 과정에서 터널 표면 주변의 응력 재분배는 암석의 역학적, 열적, 수리적, 화학적 특성에 지속적인 변화를 일으켜 굴착손상영역을 형성한다. 여기서 응력 분포는 변하지만, 암석 특성은 변경되지 않는 지역은 응력 재분배 영역으로 정의된다.

Bäckblom and Martin(1999)은 암반의 손상 영역을 암석이 모암에서 완전히 분리된 균열 영역(Failed Zone), 새로운 균열의 발생으로 인한 변형계수의 감소 및 수리전도도의 증가 등 암반의 물성이 영구히 변화된 구간인 손상 영역(Damaged Zone), 암반 물성의 변화없이 응력이나 수압 분포에 변화가 발생하는 교란 영역(Disturbed Zone)등 총 3가지 영역으로 구분하였다. Tsang et al.(2005)은 암반손상영역을 수리역학적, 지화학적 특성 변화를 기준으로 지하수 유동 특성에 큰 변화를 야기하는 수리역학적·지화학적 변화가 발생하는 구간을 굴착손상영역(Excavation Damaged Zone, EDZ), 수리역학적·지화학적 변화에 의한 지하수 유통 특성에 변화가 없는 구간을 굴착교란영역(Excavation disturbed Zone, EdZ) 2가지 영역으로 분류하여 정의하였다.

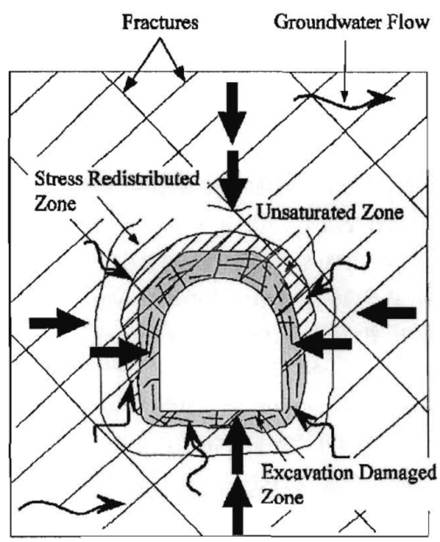

Fig. 1. Development of EDZ around Underground Tunnel (Sato et al., 2000)

Perras and Diederichs(2016)는 굴착손상영역과 관련된 이전의 기존 용어들을 Fig. 2와 같이 정의하였다. 암반의 손상 영역을 건설손상영역(Construction Damage Zone, CDZ), 과손상영역(Highly Damaged Zone, HDZ), 굴착손상영역(Excavation Damaged Zone, EDZ), 굴착영향영역(Excavation Influence Zone, EIZ)의 4가지 영역으로 분류하였다.

1) 건설손상영역: 발파나 기계 굴착 방법의 변경으로 인한 공동의 구조적 손상 형태가 발생하는 구간
2) 과손상영역: 굴착 방법과 관계없이 연결된 미세 균열을 통해 관측되는 공동의 기하 형상, 공동 구조 및 유도 응력이 변화하는 구간
3) 굴착손상영역: 손상의 추가적인 확장 없이 손상 영역 내에서 비가역적으로 변화된 암석 물성과 균열을 포함하며, 일정한 구간에서는 손상 정도가 점진적으로 전이되는 구간
4) 굴착영향영역: 손상 영역 내에서 응력/변형률의 거동이 탄성적 변화만 일어나는 구간

Bäckblom and Martin(1999)이 정의한 영역과 비교하면, 굴착손상영역은 동일한 의미를 유지하며, 구조손상영역과 과손상영역은 굴착균열영역(EFZ)에 해당하며, 굴착영향영역은 굴착교란영역에 해당한다.

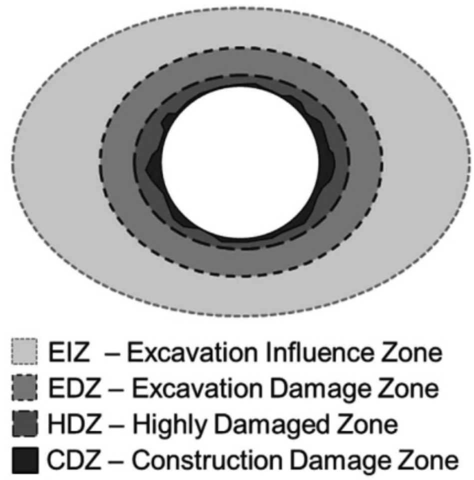

Fig. 2. Defining terms related to EDZ around tunnels (Perras and Diederichs, 2016)

2.2 굴착손상영역 연구 역사

터널 주변의 굴착손상영역에 관한 연구는 초기 1980년대에 시작되었다. 굴착손상영역이 터널 주변의 수리적 거동에 미치는 영향은 스웨덴의 스트리파(Stripa) 광산 실험 중에 최초로 관찰되었다(Fairhurst et al., 1993). 지난 수십 년 동안 굴착손상영역 연구의 중요한 부분은 굴착손상영역으로 인한 변화를 평가하였으며, 지하 연구시설 건설 중 발파로 인한 굴착손상영역 영역 내 암반의 탄성파 속도 및 터널 개구 부근의 투수율 변화를 양적으로 측정하는 데 중점을 두었다. 스웨덴 에스푀 지하연구실(Äspö Hard Rock Laboratory, Emsley et al., 1997), 일본 카마이시(Kamaishi) 및 토노(Tono) 광산(Sato et al., 2000), 캐나다 AECL 지하 연구시설(Atomic Energy of Canada Limited Underground Research Laboratory, Bäckblom and Martin, 1999) 등 15개의 지하 연구시설에서 수행된 굴착손상영역 연구의 기간과 심도, 굴착손상영역 특성은 아래 Fig. 3과 Table 1에 요약되었다.

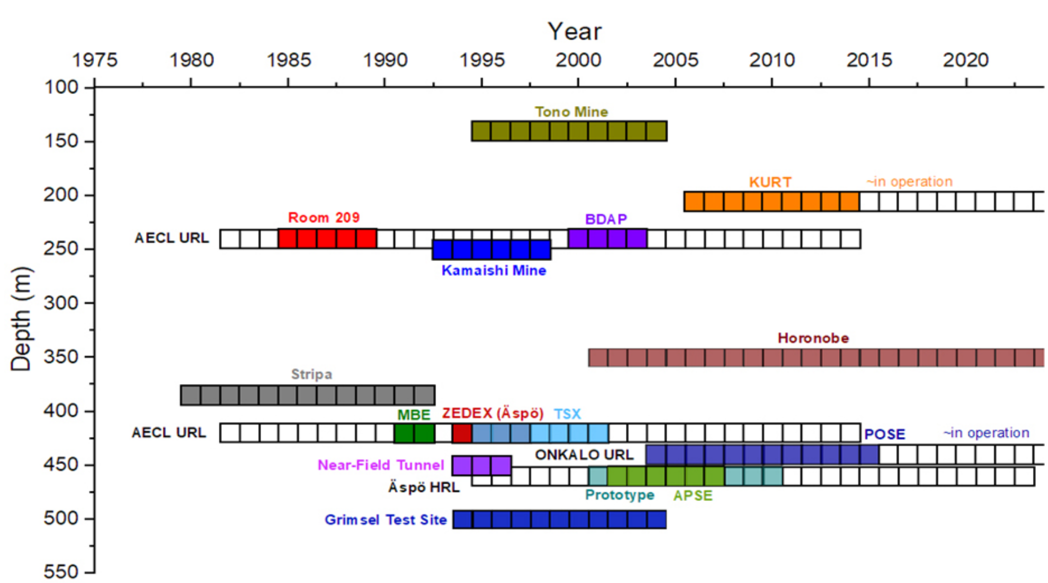

Fig. 3. EDZ Research Timeline at Major URL

Table 1. The extent and properties of the EDZ measured in URLs (modified from Lee et al., 2011, Bäckblom, 2008)

Country	Project	Excavation Method	EDZ Extent (m)	Tunnel Diameter (m)	E (GPa)	σ_C (MPa)	Reference
Canada	Room 209	Drill&Blast	0~0.3	3.6	70	193	Chandler et al., 2002
	TSX	Drill&Blast	0.3~1	3.9	65	238	Chandler et al., 1996
	BDAP	Drill&Blast	0~0.6	4.0	66	220	Read and Martin, 1996 Chandler et al., 2002
	Mine-by Experiment	Mechanical	0.2~0.3	3.5	66	220	Chandler et al., 1996
Sweden	Stripa	Drill&Blast	0~0.8	3.6	69	207	Gray, 1993
	ZEDEX	Drill&Blast	0.3~0.8	5.0	69	195	Emsley et al., 1997 SKB, 1999
		TBM	0~0.03	5.0	69	195	
	APSE	Drill&Blast	0	1.75	76	211	Emsley et al., 1997 SKB, 1999
	Prototype	TBM	0.01	5.0	81	224	Autio et al., 2005
Switzerland	NFTP	Drill&Blast	0~2	3.5	11.4	28	Marschall et al., 1999
	FEBEX	TBM	0~0.003	3.5	56	152	Bäckblom, 2008
Japan	Kamaishi Mine	Drill&Blast	1.4	3.5	64.3	151.9	Matsui et al., 1998, 2003
		Mechanical	0.8	3.5	64.3	151.9	
	Tono Mine	Drill&Blast	0.8~1	6.0	2.8	6.6	Sugihara et al., 1993 Sato et al., 2000
		Mechanical	0~0.3	6.0	2.8	6.6	
	Horonobe	Mechanical	0~0.2	4.0	1.82	15.4	Matsui et al., 2007
Korea	KURT	Drill&Blast	1.1~2.4	6.0	56	100	Lee et al., 2011
Finland	ONKALO	TBM	0~0.02	1.5	55	108	Autio, 1996 Autio et al., 2006

3. 굴착손상영역 특성

3.1 굴착손상영역 발생에 영향을 미치는 요인

굴착손상영역은 굴착과 관련된 암반의 특성과 굴착 방법에 의해 크게 영향을 받는다. Hudson et al.(2009)은 굴착손상영역에 영향을 주는 인자에 대해서 굴착과 관련된 암반 특성인 터널 단면의 형상, 응력장의 특성(크기, 방향, 이방성), 지질구조, 암반의 역학적 물성과 굴착 방법인 발파 굴착과 기계식 굴착으로 크게 나누었다.

3.1.1. 굴착 암반 특성

굴착손상영역의 발생으로 인해 암반의 특성은 변화하게 되며, 그 변화 정도는 굴착으로 인해 발생되는 변위, 응력장의 특성 그리고 지하수 유입 정도에 영향을 받게 된다. 굴착손상영역의 발생에 의한 암반 특성의 변화 정도는 다음과 같은 6가지 요인에 의해 영향을 받게 된다(Hudson and Harrison, 2000, Hudson et al., 2009).

1) 터널 단면: 터널 주변에서의 응력 집중은 터널 단면의 형상에 의존하며 응력이 집중되는 모서리 부분과 터널 단면이 큰 대단면 터널의 경우 상대적으로 큰 굴착손상영역이 발생한다.
2) 터널의 굴착 방향: 일반적으로 터널의 굴착 방향이 최대 주응력과 수직일 때, 터널 주변의 응력은 가장 크고, 굴착 방향이 최대 주응력과 평행할 때, 그 응력은 가장 작게 나타나기 때문에 터널의 굴착 방향과 최대 주응력 방향은 굴착손상영역의 생성과 성장에 영향을 미친다.
3) 응력장: 현지 응력이 클수록 터널 주변부에 작용하는 응력은 클 수밖에 없으며, 현지 응력이 큰 경우 굴착손상영역이 더 크게 발생하며 응력장의 방향과 그 정도에 따라 굴착손상영역의 범위가 변화한다.
4) 암석의 역학적 물성: 굴착 후 발생하는 터널의 변위는 암석의 강도, 탄성 계수와 같은 역학적인 물성과 관련이 있으며, 점토질이 풍부한 암석의 경우 팽창(swelling) 특성이 굴착손상영역의 발생에 영향을 미친다.
5) 암반의 역학적 물성: 암석의 역학적인 물성과 마찬가지로, 암반의 강도, 변형계수, 강성값 그리고 절리 군의 정보에 따라 굴착손상영역의 발생 정도가 증가하며 암반 내에 존재하는 절리 군의 수, 절리 간격 그리고 절리 방향은 굴착손상영역의 발생에 영향을 미친다.
6) 지질구조: 지질구조에 따라 암반이 받는 응력 상태와 터널의 변위 발생 정도 그리고 지하수 유입 정도가 다르게 나타나므로 터널이 위치하는 지질학적 구조에 따라 굴착손상영역의 영향이 변화한다.

3.1.2. 굴착 방법

일반적으로 지하공간의 굴착은 발파와 기계식 굴착을 이용하여 이루어진다. 굴착 방법에 따라 파괴 메커니즘이 다르므로 굴착으로 발생하는 굴착손상영역의 특성과 그 범위 정도는 크게 달라진다. 따라서, 캐나다의 지하 연구시설, 일본의 카마이시 광산, 스웨덴의 에스푀 지하 연구시설 그리고 스위스의 그림셀(Grimsel) 시험 부지에서는 굴착 방법에 따른 굴착손상영역의 특성을 규명하고자 하였다. 이들 지하연구실에서의 연구 결과, 발파에 의한 굴착으로 발생한 굴착손상영역은 기계식 굴착을 발생한 굴착손상영역보다 훨씬 더 큰 것으로 일관되게 나타났다(Olsson and Winberg, 1996, Emsley et al., 1997, Bäckblom and Martin, 1999, SKB, 1999, Matsui et al., 2003, Bäckblom, 2008).

3.2 굴착손상영역이 주변 암반에 미치는 영향

사용후핵연료 심층 처분장에서는 굴착손상영역의 발생으로 인한 초기 암반 물성의 비가역적 변화가 열적, 수리적, 역학적, 화학적 거동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 굴착손상영역의 영향은 주변 암반의 상태 변화와 관련된 응력, 공극압, 지하수 유동, 지하수의 화학적 변화 등과 암석 강도, 탄성 계수, 열전도도, 수리전도도 등과 같은 물성 변화로 구분된다(Kwon and Cho, 2008).

첫째, 굴착손상영역은 열물성들의 초기값과 차이를 보이며 주변 암반의 열적 거동에 영향을 미친다. 굴착손상영역에서의 열전도도는 모암에 비해 상당한 감소를 보여 주며, 이는 굴착손상영역이 존재할 때 심층 처분장 온도 분포에 영향을 주어 심층 처분장 근계영역에서의 온도를 상승시킬 가능성이 있다(Cho et al., 2019). 이러한 굴착손상영역에서의 열적 변화는 암반의 변형, 응력에도 영향을 주어 스폴링 파괴나 암반의 구조적 안정성 저하에 원인이 된다. 굴착손상영역이 암반의 열적 거동에 미치는 영향을 연구하기 위해 스웨덴 Äspö 지하 연구시설에서 수행된 ÄPSE (Äspö Pillar Stability Experiment) 프로젝트에서는 두 개의 처분공 사이 광(Pillar)에서 열응력에 의한 스폴링 파괴 현상을 연구하였다(Andersson, 2007). 또한, 굴착손상영역의 열적 영향은 처분시스템을 구성하는 재료의 온도 변화와 암반의 지보 시스템의 성능 저하에도 영향을 줄 것으로 예상된다.

둘째, 굴착손상영역에서 새로운 균열의 발생 및 기존 균열의 확장에 따른 수리전도도와 공극압의 변화가 예상되며, 이는 심층 처분장 주변의 수리적 거동에 영향을 줄 수 있다. 굴착손상영역으로 인한 수리적 거동 변화는 심층 처분장 내 공학적 방벽과의 지하수 접촉 촉진을 야기하여 처분 용기의 부식 및 완충재 포화 속도 증가를 유발할 수 있다(Bäckblom, 2008).

셋째, 고심도 암반 환경에서 건설되는 사용후핵연료 처분장은 굴착으로 인한 암반 변형 및 응력 변화, 현지응력, 절리분포 등과 같은 역학적 인자들에 따라 구조적 안정성에 영향을 받는다. 굴착손상영역의 발생은 공동 주변의 응력 재분포, 발파 충격으로 인한 기존 균열의 확장 및 낙반과 같은 암반 구조적 변화를 일으켜 안정성에 영향을 미친다. 굴착손상영역에서는 영구적인 암반의 역학적 물성 감소가 일어나며, 이는 장기 안정성이 필요한 심층 처분장의 암반 및 지보 시스템의 성능에도 영향을 줄 수 있다(Emsley et al., 1997, Hudson et al., 2009, Olsson et al., 2009).

넷째, 굴착손상영역의 발생은 공기 노출에 의한 산화, 암반 내 지하수 접촉에 따른 공학적 방벽과의 화학적 변화를 촉진할 수 있다. 암반 손상으로 인한 균열 확장은 지하수의 유입으로 지표로부터의 화학물질이나 암반 내의 광물과의 반응을 야기할 수 있으며, 이는 처분시스템의 화학적 안정성 및 성능 저하가 발생하여 공학적 방벽으로의 핵종 유출 촉진에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다(Kwon and Cho, 2008).

4. 굴착 방법에 따른 굴착손상영역 특성

4.1 암반 특성, 굴착 방법과 굴착손상영역 관계 선행연구

여러 선행연구에서는 암반 특성, 굴착 방법과 굴착손상영역 간의 관계가 분석되어왔다. Siren et al.(2015)는 TBM 굴착면과 발파 굴착면의 탄성 계수를 비교하기 위해 이축 실험(Biaxial Testing)을 수행했다. 시료는 스웨덴 Äspö 지하 연구시설의 TASQ 터널에서 얻어진 암석을 사용하였으며, 해당 구역의 탄성 계수는 65.1~73.4 GPa(평균 69.5 GPa)로 측정되었다. 이축 실험을 수행하여 측정된 탄성 계수는 TBM 표면은 평균 63.9 GPa, 표면으로부터 1~2 m 이내의 암반은 평균 64.8 GPa로 나타났다. 발파 굴착면의 탄성 계수는 굴착면은 평균 57.1 GPa, 표면으로부터 1~2 m 이내의 암반은 평균 58.9 GPa로 나타났다. TASQ 터널의 측정된 탄성 계수가 65.1~73.4 GPa인 것을 고려한다면 탄성 계수가 TBM 굴착의 경우는 6.7~8.0%, 발파 굴착의 경우는 15.3~17.8% 정도 하락한 것을 확인할 수 있다(Fig. 4).

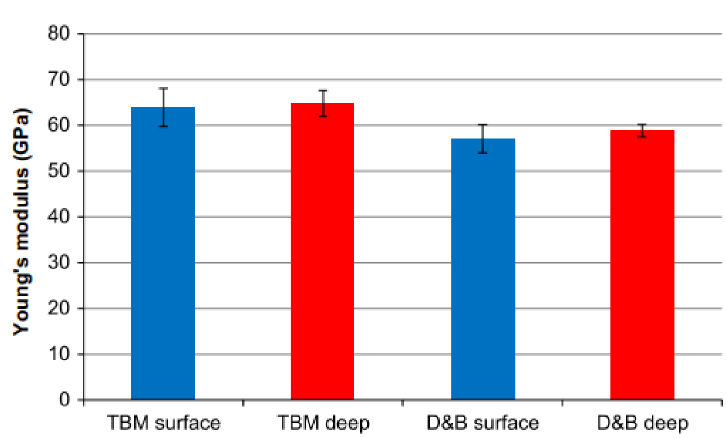

Fig. 4. Elastic modulus of TBM and D&B tunnels at tunnel surface and deep (Siren et al., 2015)

Hoek and Diederichs(2006)은 굴착손상영역이 발생한 터널에서 터널 면으로부터 거리에 따른 암반의 탄성 계수를 아래 식 (1), (2)로 도출하였다. 이 경험식은 발파-유발 손상 영역(Blast-induced Damaged Zone)의 탄성 계수를 지질 강도계수(Geological Strength Index, GSI)와 감소 계수인 교란 계수(D)를 사용하여 추정하였다.

$$E_{rm} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad \text{for } \sigma_i > 100 \ MPa \tag{1}$$

$$E_{rm} = 100000\left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{(75 + 25D - GSI)/11)}}\right) \tag{2}$$

Saiang(2011)은 현장 측정 결과, 발파유발 손상 영역의 탄성 계수는 터널 경계부터 손상되지 않은 영역까지 선형적으로 변화할 수 있음을 확인하였다(Fig. 5). 또한, Hoek과 Diederichs은 교란 계수가 적용되는 손상영역을 터널 경계에서 1~2 m 이내로 제한하고 발파-유발 손상 영역의 최소 탄성 계수를 무결암의 50%로 가정하지만, Saiang(2011)은 현장 측정 결과 이 값보다 낮게 나타날 수 있음을 관찰하였다.

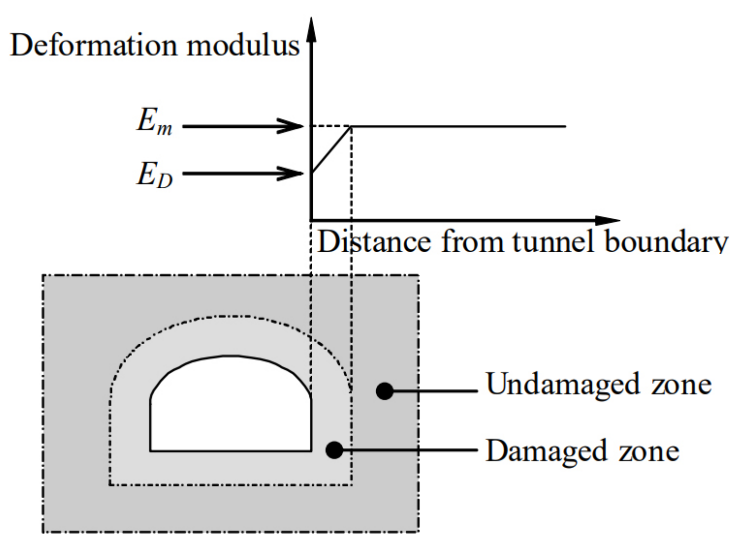

Fig. 5. Elastic modulus of rock according to distance from the tunnel surface (Saiang, 2011)

국내에서는 Kim and Jeong(2021)이 CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) 기법을 통해 암반 상태, 터널 지름 및 터널 깊이가 굴착손상영역의 범위에 미치는 영향을 조사하여 한국에서 터널 설계에 사용되는 암석의 RMR 등급, 굴착 터널 직경과 깊이에 따른 굴착손상영역 특성을 수치해석을 통해 민감도 분석을 수행하는 시도를 하였다.

4.2 굴착 방법에 따른 굴착손상영역 범위와 탄성파 속도 변화

본 사례연구에서는 굴착 방법과 굴착손상영역 특성의 관계를 분석하여 각 지하 연구시설에서 관측된 데이터를 활용하여 굴착 방법에 따른 굴착손상영역의 범위, 탄성파 속도 변화의 관계를 도출하였다.

4.2.1. 발파 굴착이 사용된 지하 연구시설

발파를 사용하여 굴착된 지하 연구시설 부지에서 측정된 굴착손상영역 범위와 탄성파 속도 간의 관계는 Fig. 6과 같다(Emsley et al., 1997, Wang et al., 2018, Park and Kwon, 2017, Lee et al., 2011, Hansen, 2003). 터널 벽 근처에서 P-파 속도가 급격히 감소하고, 터널 벽에서 멀어질수록 서서히 증가하며 최종적으로 무결암에서 측정된 P-파 속도로 회복하는 것을 확인할 수 있다.

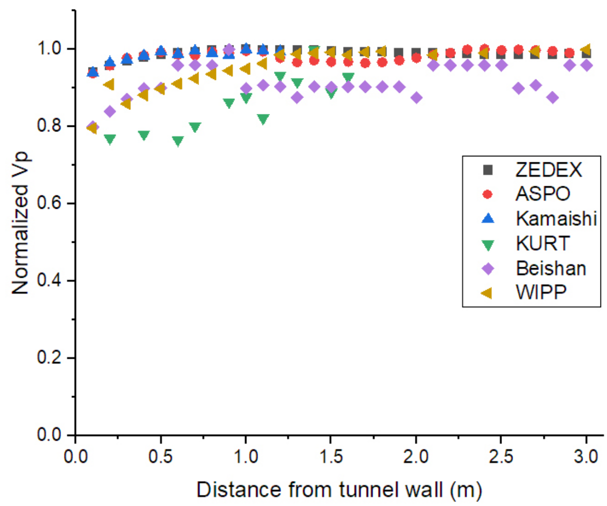

Fig. 6. Normalized P-wave velocity along the distance from tunnel wall of each URL (Drill and Blast)

추가로 발파 후 터널 벽면으로부터 0~0.1 m 구간의 P-파 속도 변화율과 굴착손상영역 범위 간의 관계를 분석하였다(Fig. 7). 터널 벽면의 P-파 속도의 변화가 클수록 굴착손상영역 범위가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이 관계를 고려하면, 발파 후 터널 벽에서 측정된 P-파 속도와 발파 이전의 무결암의 P-파 속도를 비교하여 굴착손상영역 범위를 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

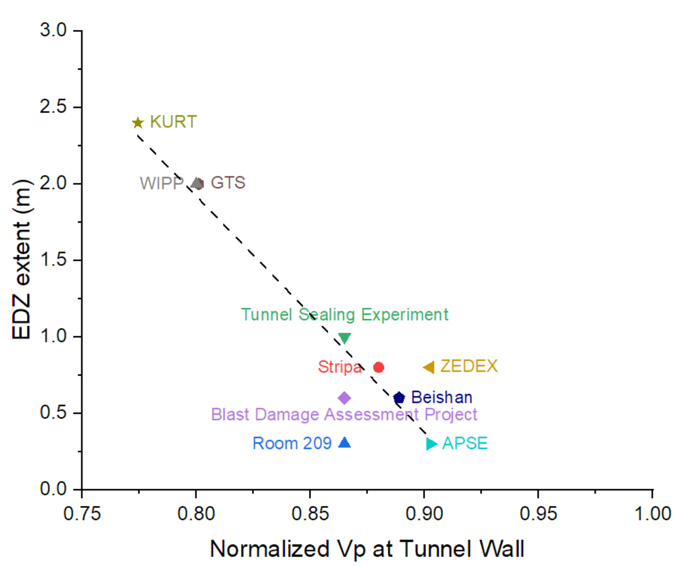

Fig. 7. The relationship between the P-wave velocity change on the tunnel wall and the EDZ extent

여러 연구에서는 일축 압축 강도와 탄성파 속도 간의 관계를 설명하기 위해 회귀 분석을 수행한 바 있으며, 간단한 회귀 분석을 통해 일축 압축 강도와 P-파 속도 간의 관계가 확인하였다(Minaeian and Ahangari, 2013). Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 암석의 탄성 특성의 변화와 관련된 탄성파 속도 변화율과 굴착손상영역 범위 간에 선형적인 관계를 보였으며, P-파 속도 변화가 감소함에 따라 굴착손상영역 범위가 감소하는 것을 관측하였다. 이 관계를 고려하면 일축 압축 강도 변화율도 굴착손상영역 범위와 유의미하게 관련이 있을 것으로 예상한다.

4.2.2. 기계식 굴착이 사용된 지하 연구시설

발파 굴착의 경우와 동일하게, 기계식 굴착을 사용하여 굴착된 지하 연구시설 부지의 굴착손상영역 범위와 탄성파 속도 변화 관계를 정리, 분석하였다(Emsley et al., 1997, Enescu et al., 2014, Read and Martin, 1996, Eitzenberger, 2012). 기계식 굴착에 대해서는 굴착손상영역 범위와 P-파 속도 변화 간의 유의미한 경향을 확인할 수 없었다(Fig. 8). 이는 기계식 굴착 지하 연구시설에서 관측된 굴착손상영역 범위가 0~0.3 m로 비교적 균일했기 때문으로 예상된다.

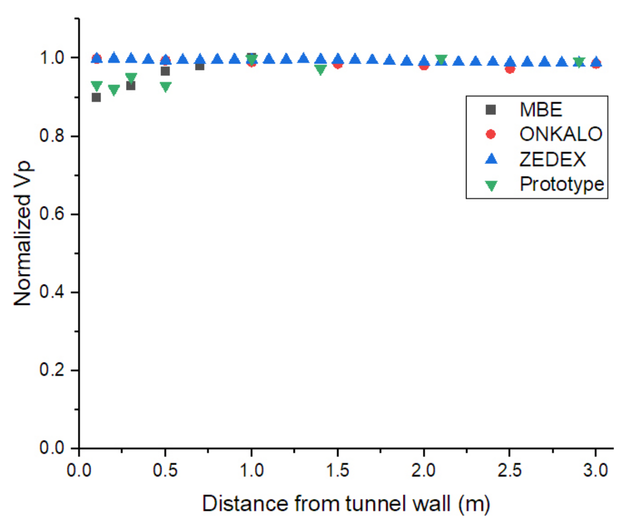

Fig. 8. Normalized P-wave velocity along the distance from tunnel wall of each URL (Mechanical Excavation)

이러한 결과는 14개의 부지에서 얻은 제한된 양의 데이터에서 얻어진 것이므로 향후 추가 데이터를 통한 분석이 필요하다.

5. 결 론

굴착손상영역(EDZ)은 사용후핵연료 처분장의 성능평가 및 안전성 평가에 영향을 미치는 중요한 요소로 간주되고 있다. 미국, 일본, 스웨덴, 캐나다, 프랑스, 스위스, 벨기에 등 여러 국가에서 지하 연구 시설(URL)을 건설하여 굴착손상영역의 특성 및 범위를 정량적으로 평가하는 연구를 진행하였다. 일련의 국내외 굴착손상영역 실증 연구를 통해 얻은 결과는 현장 조건이 상이하고, 굴착손상영역의 정의 또한 차이가 있어 일반화하기 어려운 측면이 있으나 선행연구를 통해 일반화된 요약과 한계점은 아래와 같이 정리할 수 있다.

1) 암반의 열적, 수리적, 역학적 성질 변화를 통해 살펴본 굴착에 따른 굴착손상영역의 범위는 발파 굴착의 경우는 1~2 m, 기계식 굴착의 경우는 0~0.3 m 이내로 처분 터널과 처분공 인근에 국한된다.
2) 기계식 굴착의 경우 발파 굴착과 비교하면 굴착손상영역의 영향을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 발파 굴착의 경우 발파방식의 영향은 예상과 달리 굴착손상영역에 큰 차이를 발생시키지 않았다는 보고도 있으나 실험과정의 문제점 등을 고려하면 발파 기술의 개선이 굴착손상영역 저감에도 기여할 수 있을 것으로 생각된다.
3) 굴착으로 인한 굴착손상영역의 투수율 변화는 수십 배 혹은 수백 배의 증가가 관찰되는 경우도 있지만 이와 상반되는 결과 또한 보고되었다. 특히, 수리적 연결 여부, 증가한 투수율의 이방성, 수리적 실험에 미치는 영향 인자와 굴착에 따른 광물의 침전, 용해 등 지구화학적 변화가 암반의 역학적 수리적 특성 변화에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.
4) 굴착손상영역 등을 비롯한 현지 암반의 거동과 관련된 이해는 해당 국가 고유의 지질학적 특성에 좌우되는 측면이 크므로 국내 암반의 조건에 맞는 굴착손상영역 관련 실증 연구가 필요하다.

본 사례연구에서는 국내외 지하 연구시설에서의 굴착손상영역의 평가 및 굴착손상영역과 관련된 실증적 연구 사례를 분석하였다. 굴착손상영역의 정의와 역사를 시작으로 굴착손상영역 발생에 영향을 미치는 요인과 굴착손상영역이 주변 암반에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 굴착 방법과 굴착손상영역 범위, 탄성파 속도 변화 간의 관계를 분석하였다. 탄성파 속도 변화율과 굴착손상영역 범위 간의 관계를 분석하였으며, P-파 속도 변화가 감소함에 따라 굴착손상영역 범위가 감소하는 것을 관찰하였다.

이전 선행연구들은 굴착손상영역의 특성을 이해하고 현장 및 실험실 실험을 통해 굴착손상영역의 범위를 정량적으로 평가하기 위해 수행되었으나 이러한 경험적 연구에서 얻은 결과는 굴착 방법과 심도, 암반 특성, 현지응력과 같은 다양한 현장 조건과 굴착손상영역의 다양한 정의로 인해 연구 결과를 일반화하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 국내 사용후핵연료 처분장을 위해서는 국내 암반 조건에 따른 굴착손상영역의 영향을 분석하고 다양한 관점에서 굴착손상영역의 정량적 평가를 시도하기 위해 다양하고 넓은 범위의 경험적, 수치적 연구를 수행하는 것이 필요하다.

REFERENCES

Andersson, J.C., 2007, Äspö pillar stability experiment: final report: rock mass response to coupled mechanical thermal loading, SKB TR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Autio, J., 1996, Characterization of the excavation disturbance caused by boring of the experimental full scale deposition holes in the research tunnel at Olkilouto. Posiva-96-09, Posiva, Helsinki.

Autio, J., Gribi, P., Johnson, L., and Marschall, P., 2006, Effect of excavation damaged zone on gas migration in a KBS3H type repository at Olkilouto, Physics and Chemistry of the Earth, 31, 649-653.

Autio, J., Hjerpe, T., and Siitai-Kauppi, M., 2005, Porosity, diffusivity and permeability of EDZ in crystaline rock and effect on the migration in a KBS-3 type repository. In EU, 200, Impact of excavation distubed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, Proc. European Commission Cluster Conference and Workshop, pp. 149-155.

Bäckblom, G. and Martin, C.D., 1999, Recent experiments in hard rocks to study the excavation response: Implications for the performance of a nuclear waste geological reposito-ry, Tunn. Undergr. Space Technol., 14(3), 377-394.

Bäckblom, G., 2008, Excavation damage and disturbance in crystalline rock - Results from experiments and analyses, SKB TR08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, A., Tric, T., and Mayor, J., 2002, Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, Eng. Geol., 66, 19-38.

Bossart, P., Tric, T., Meier, P.M., and Mayor, J., 2004, Structural and hydrogeological characterisation of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland), Appl. Clay Sci., 26, 429-448.

Chandler, N.A., Cournut, A., Dixon, D.A., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Matsumito, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J., and Vignal, B., 2002, The five-year report of the Tunnel Sealing Experiment: An international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727, ChalkRiver, Canada

Chandler, N.A., Kozak, E.T., and Martin, C.D., 1996, Connected pathways in the EDZ and the potential for flow along tunnels. In: Martino, J. B., Martin, C. D., (Eds), Proceedings of Canadian Nuclear Society.

Cho, W.J., Kim, J.S., and Kim, G.Y., 2019, Effects of excavation damaged zone on thermal analysis of multi-layer geological repository, J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 17(1), 75-94.

Eitzenberger, A., 2012, Wave Propagation in Rock and the Influence of Discontinuities. PhD Thesis. Luleå tekniska universitet, Luleå, Sweden.

Emsley, S., Olsson, O., Stenberg, L., Alheid, H.J., and Falls, S., 1997, ZEDEX − a study of damage and disturbance from tun-nel excavation by blasting and tunnel boring, SKB TR 97-30, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Enescu, N., Cosma, C., and Crawford, J., 2014, ONKALO 3D tunnel seismic investigations, Olkiluoto 2013, POSIVA-WR-14-49, Posiva Oy.

Fairhurst, C., 1999, Rock mechanics and nuclear waste repositories, Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories, American Rock Mechanics Association, pp 1-44.

Fairhurst, C., Gera, F., Gnirk, P., Gray, M., and Stillborg, B., 1993, OECD/NEA International Stripa Project 1980-1992. Overview Volume I, Executive Summary, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Gray, M., 1993, OECD/NEA International Stripa Project 1980-1992, Overview III, Engineered Barriers, Svensk Kärnbrän-slehantering AB, Stockholm.

Hansen, F.D,, 2003, The Disturbed Rock Zone at the Waste Isolation Pilot Plant, SAND2003-3407, Sandia National Laboratories, Albuquerque NM USA.

Hoek, E. and Diederichs, M.S., 2006, Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43(2), 203-215.

Hudson, J.A. and Harrison, J.P., 2000, Engineering rock mechanics: an introduction to the principles, Elsevier.

Hudson, J.A., Bäckström, A., Rutqvist, J., Jing, L., Backers, T., Chijimatsu, M., Christiansson, R., Feng, X.T., Kobayashi, A., Koyama, T., Lee, H.S., Neretnieks, I., Pan, P.Z., Rinne, M., and Shen, B.T., 2009, Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal, Environ. Geol., 57(6), 1275-1297.

Kim, D. and Jeong, S., 2021, Estimation of the excavation damage zone in TBM tunnel using large deformation FE analysis, Geomech. Eng., 24(4), 323-335.

Kwon, S. and Cho, W.J., 2008, The influence of an excavation damaged zone on the thermal-mechanical and hydro- mechanical behaviors of an underground excavation, Eng. Geol., 101, 110-123.

Lee, C.S., Kwon, S.K., Choi, J.W., and Jeon, S,. 2011, An estimation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel, Tunnel & Underground Space, 21(5), 359-369.

Malmgren, L., Saiang, D., Töyrä, J., and Bodare, A., 2007, The ex-cavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine, Eng. Geol., 61, 1-15.

Marschall, P., Fein, E., Kull, H., Lanyon, G.W., Liedtke, L., Müller-Lyda, H., Shao, 1999, Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN), Nagra TR 99-07, Nagra, Wettingen, Switzerland.

Martin, C.D., Kaiser, P.K., and McCreath, D.R., 1999, Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels, Can. Geotech. J., 36(1), 136-151.

Martino, J.B. and Chandler, N.A., 2004, Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory, Int. J. Rock

Mech. Min. Sci., 41(8), 1413-1426.

Matsui, H., Kurikami, H., Kunimaru, T., Morioka, H., and Hatanaka, K., 2007, Horonobe URL project − present status and future plans. In: Eberhardt, E., Stead, D., Morrison, T. (Eds.), Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands, Taylor & Francis Group, London, pp. 1193-1201.

Matsui, H., Sato, T., Sugihara, K., and Kikuchi, T., 1998, Overview of the EDE(Excavation Disturbance Experiment)-II at Kamaishi mine, Kamaishi Int. Workshop Proc., 24-25 Aug. 1998. PNCTN7413 98-023. JNC, Tokyo.

Matsui, H., Sugihara, K., and Sato, T., 2003, In-situ experiments on excavation disturbance in JNC's Geoscientific Research Programme. Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, Proceedings Euopean Commission CLUSTER Conference and Workshop on EDZ in Radioactive Waste Geological Repositories, ENRESA

Minaeian, B. and Ahangari, K., 2013, Estimation of uniaxial compressive strength based on P-wave and Schmidt hammer rebound using statistical method, Arab. J. Geosci., 6, 1925-1931.

Olsson, M., Markstroem, I., Pettersson, A., and Straeng, M., 2009, Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Aespoe HRL, SKB TR-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Olsson, O.L. and Winberg, A., 1996, Current understanding of extent and properties of the excavation disturbed zone and its dependence of excavation method. In: Martino, J. B., Martin, C.D. (Eds.), Proceedings of the International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, pp. 101-112.

Park, S. and Kwon, S., 2017, Status of researches of excavation damaged zone in foreign underground research laboratories constructed for developing high-level radioactive waste disposal techniques, Explosives and Blasting, 35(3), 31-54.

Perras, M.A. and Diederichs, M.S., 2016, Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks, J. Rock Mech. and Geotech. Eng., 8, 60-74.

Read, R.S. and Martin, C.D., 1996, Technical summary of AECL's Mine-By Experiment. Phase 1: Excavation Responses, AECL-11311, CoG-95-171. AECL, Pinawa, Canada.

Saiang, D., 2011, Blast-Induced Damaged Zone Studies Final Report to Trafikverket, Division of Mining and Geotechnical Engineering Luleå University of Technology Sweden.

Sato, T., Kikuchi, T., and Sugihara, K., 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, Eng. Geol., 56, 97-108.

Siren, T., Kantia, P., and Rinne, M., 2015, Considerations and observations of stress-induced and construction-induced excavation damage zone in crystalline rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 73, 165-174.

SKB, 1999, SR 97 - Deep repository for spent nuclear fuel, SR 97 - Post-closure safety. Main report - Vol. I, Vol. II and Summary, SKB TR-99-06, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Stephansson, O., 1999, Rock mechanics and rock engineering of spent nuclear fuel and radioactive waste repositories in Sweden, Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories, America Rock Mechanics Association, pp. 205-227.

Sugihara, K., Yoshioka, H., Matsui, H., and Sato, T., 1993, Preliminary results of a study on the responses of sedimentary rocks to shaft excavation, Eng. Geol., 35, 223-228.

Tsang, C.F., Bernier, F., and Davies, C, 2005, Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays in the context of radioactive waste disposal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 42(1), 109-125.

Wang, J., Chen, L., Su, R., and Zhao, X., 2018, The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests, J. Rock Mech. and Geotech. Eng., 10, 411-435.