

데이터베이스 기반 로드헤더 커팅헤드 설계시스템



최순욱
한국건설기술연구원
지반연구소
전임연구원
(soonugi@kict.re.kr)



장수호
한국건설기술연구원
지반연구소
연구위원
(sooho@kict.re.kr)

1. 서론

로드헤더(roadheader)는 부분단면 굴착기 또는 자유 단면 굴착기로 불리기도 하며, TBM(Tunnel Boring Machine)과 달리 단면 형상에 따른 큰 제약이 없이 터널을 굴착할 수 있는 기계 굴착장비이다. 이 굴착장비는 압축강도가 최대 170 MPa인 경암 굴착도 가능한 것으로 보고되고 있으나, 픽커터의 절삭성과 내마모성의 한계로 인하여 압축강도가 100 MPa 이하인 비교적 연암 조건에서 효과적인 것으로 알려져 있다(Rostami 외, 1994, Tunnel Business Magazine, 2011). 로드헤더는 1930년대 초에 구 소련에서 개발된 이후로 선진국을 중심으로 전 세계적으로 터널과 광산에서 널리 활용되고 있으며, 유럽의 경우에는 연암이 짙은 도심지 터널에서 많이 사용되고 있다. 미국의

경우에는 역사적으로 발파공법에 의한 암반 굴착이 주를 이루었지만, 로드헤더 기술의 발전과 사회적인 수요로 인하여 21세기 들어서 로드헤더의 사용이 급증하고 있다. 특히, 최근 들어 건설되고 있는 뉴욕의 East Side Access 터널, 대단면 터널인 캘리포니아 Devil's Slide 터널, Caldecott Fourth Bore 고속도로 터널 등의 대규모 프로젝트에서도 로드헤더의 활용성이 높은 것으로 보고되고 있다(Tunnel Business Magazine, 2011)

로드헤더는 단면 형상에 대한 대응력이 좋을 뿐만 아니라, 장비의 제작기간이 짧고 장비의 이동과 조립이 수월하고 TBM과 비교할 때 초기 투자비용이 적다는 것이 큰 장점이다. 특히, 단면 크기가 유사하다고 가정할 때, 대단면 터널에서 로드헤더의 투자비용은 TBM 대비 15% 수준이며, 소단면에서는 30% 수준이다. 또한, 로드헤더는 장비

대여 형식으로도 많이 활용되고 있기 때문에 소규모 프로젝트에서도 효과적이다(Tatiya, 2005). 그러나 우리나라에서 로드헤더의 적용 실적은 거의 전무하다. 그 이유로는 여러 가지가 있겠지만 국내에서는 발파위주의 터널공법 적용으로 인해 기계식 굴착공법의 연구개발 및 활용이 부족하여 로드헤더에 대한 이해가 부족한 점과 TBM과 마찬가지로 로드헤더의 핵심 설계·제작 기술 역시 독일, 영국, 오스트리아, 미국, 일본, 중국 등의 약 6개국만 보유하고 있다는 점이 로드헤더의 활용을 저해하는 요인이 되고 있다.

본 고에서는 데이터베이스에 기반한 로드헤더 커팅헤드의 설계시스템을 소개함으로써 로드헤더 설계기술에 대한 국내기술자들의 이해를 돕고 이를 통해 친환경적이고 안전한 암반 굴착이 가능한 로드헤더의 국내 활성화를 도모하고자 하였다.

2. 로드헤더의 주요 구성 및 원리

로드헤더는 그림 1과 같이 굴착작업과 관련된 전방부의

커팅헤드, 붐, 버력처리를 위한 로딩테이블(loading table 또는 apron)과 이동과 운영을 위한 설비와 동력 설비로 구성된 중앙부, 그리고 외부로의 버력반출을 위한 후방부의 체인 컨베이어(chain conveyor)와 같은 버력 반출 시스템으로 구성되어 있다.

로드헤더의 굴착성능을 좌우하는 가장 중요한 부분은 커팅헤드이다. 커팅헤드에는 암반을 절삭하는 도구로서 픽커터가 다수 부착되어 있으며 커팅헤드의 회전방향에 따라 종방향(longitudinal) 커팅헤드와 횡방향(transverse) 커팅헤드로 구분된다(그림 2). 종방향 커팅헤드는 붐의 방향과 커팅헤드의 중심축 방향이 일치하는 것이며, 횡방향 커팅헤드는 붐 방향과 커팅헤드의 중심축 방향이 직각을 이루는 것으로 정의된다. 일반적으로 커팅헤드의 회전과 장비 자중의 균형을 유지하는데 있어 횡방향 커팅헤드가 보다 유리하며 상대적으로 높은 강도의 암반을 굴착할 때 도 횡방향 커팅헤드가 사용된다. 커팅헤드의 종류에 따른 로드헤더의 장·단점은 표 1과 같다.

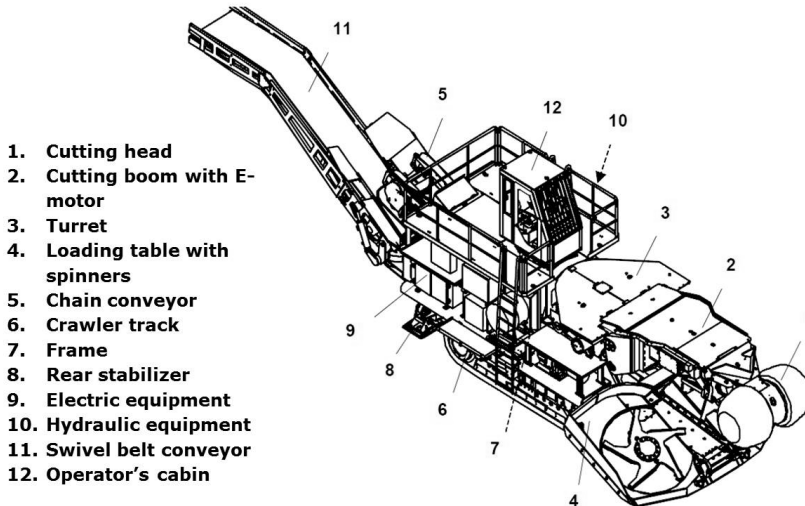


그림 1. 로드헤더의 주요 구성(modified from Pichler, 2011)



(a) 종방향 커팅헤드



(b) 횡방향 커팅헤드

그림 2. 로드헤더 커팅헤드의 종류(modified from Pichler, 2011)

표 1. 로드헤더 커팅헤드에 따른 장단점(Rostami, 2013)

Advantages	
Longitudinal(axial) cutting head	Transverse
<ul style="list-style-type: none"> • Smoother tunnel surface. • Lower pick consumption. • Lower fines and respirable dust generation. • Easy and rapid transition from sumping to arcing, lowering and lifting action. • Suitable for selective cutting in mixed face conditions. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ability to cut harder rock. • Better stability of the machine while cutting due to the direction of reaction forces • Better clearance of the floor due to the action of the head and direction of cutting
Disadvantages	
Longitudinal(axial) cutting head	Transverse
<ul style="list-style-type: none"> • Limited hardness and strength of rock • Typically more suitable for lower abrasivity rocks • Tendency to roll the machine as reaction to high torque 	<ul style="list-style-type: none"> • Higher head RPM, more wear per volume excavated • Slightly dustier due to the direction of rotation • Limited sumping depth • Limited in cutting maneuvers to the left and right due to the gap between the heads

3. 로드헤더 커팅헤드 설계시스템

로드헤더의 설계와 굴착성능의 예측작업은 많은 부분에서 경험을 기반으로 수행된다. 하지만 국내에는 로드헤더 제작사가 없을 뿐만 아니라 로드헤더에 의한 시공 실적이 거의 없는 상황이어서 로드헤더의 설계·제작 및 시공에 대한 기술이 축적되어 있지 않다. 따라서 데이터베이스를 구축하고 구축된 자료 간의 상관관계로부터 경험적인 로드헤더의 기초 설계 정보를 획득하고자 하였다. 데이터베이스 기반 로드헤더 커팅헤드 설계시스템은 143개의 커팅

헤드와 213개의 픽커터에 대한 D/B를 기반으로 커팅헤드의 최대용량과 굴착성능을 예측할 수 있는 설계 모듈을 포함하였고, 시공조건에 따른 픽커터 자동 배열설계가 가능하도록 하였다. 데이터베이스화 한 자료는 외국 12개 로드헤더 제작사의 각종 자료들로부터 수집하였고 구축된 데이터베이스의 설계정보 항목은 표 2와 같이 제작사 정보, 커팅헤드의 형식 등과 같은 일반적인 정보가 4개, 크기, 중량 등과 같이 장비 규격과 관련된 정보 4개, 커팅헤드 관련 정보 11개 및 동력 시스템 관련 정보 4개로 구성하였다.

표 2. 데이터베이스의 설계정보 항목

Classification	Information Items	
General	<ul style="list-style-type: none"> • Manufacturer • Attached form (full equipment or attachment) 	<ul style="list-style-type: none"> • Model Name • Cutting head drum type (transverse or longitudinal)
Machine information	<ul style="list-style-type: none"> • Machine weight • Machine height • Weight of attachment 	<ul style="list-style-type: none"> • Machine length • Machine width • Recommended weight of carrier
Cutting profile	<ul style="list-style-type: none"> • Cutting width • Cutting head diameter • Cutting speed • Cutting drum speed (average RPM) • Number of picks • Rock strength 	<ul style="list-style-type: none"> • Cutting height • Cutting head width • Cutting section (cross section) • Cutting force • Cutting head torque
Power system	<ul style="list-style-type: none"> • Total installed power • Maximum power of cutting head 	<ul style="list-style-type: none"> • Cutting head motor • Maximum hydraulic operating pressure

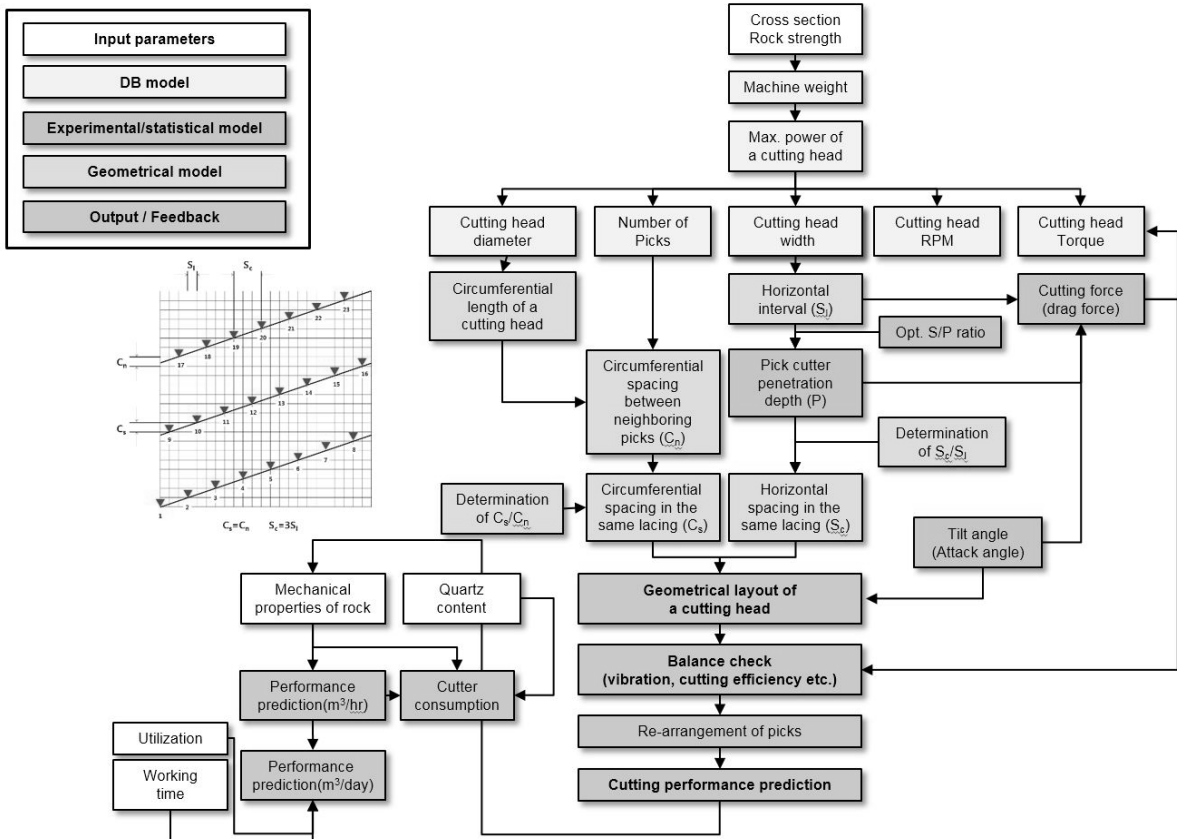


그림 3. 로드헤더 커팅헤드의 설계절차

3.1 설계방법 및 설계절차

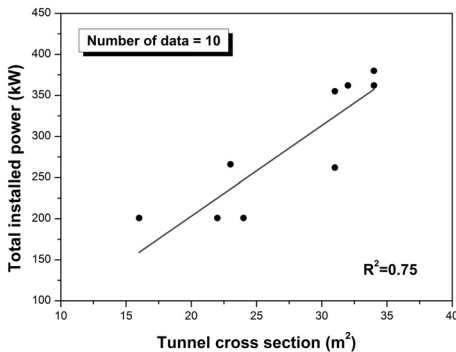
로드헤더 커팅헤드의 설계절차는 그림 3과 같다. 첫 번째로 굴착 단면적과 암석의 일축압축강도를 입력변수로 하여 로드헤더의 전체 동력을 추정하고(그림 4a 및 그림 4b), 추정된 로드헤더의 총 동력으로부터 굴착으로 인한 반력을 지지하는데 가장 중요한 로드헤더의 자중을 그림 4(c)의 관계로부터 계산한다.

그 다음으로는 데이터베이스를 활용하여 로드헤더의 전체 동력 가운데 커팅헤드에서 필요한 최대 동력의 비율을 가정한 후, 가정된 커팅헤드의 최대 동력으로부터 커팅헤드의 크기를 정의하는 폭과 직경을 그림 4(d)와 그림 4(e)의 관계로부터 산출한다. 특히, 커팅헤드의 직경과 폭은 각각 픽커터의 원주방향 간격 및 수평방향 간격을 설계

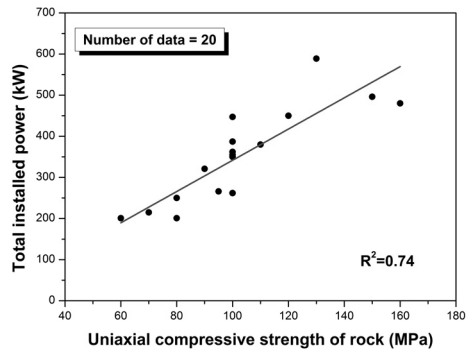
하는데 직접적으로 활용된다. 이때 픽커터의 최적 간격과 관입깊이의 비율은 LCM 실험 등을 통해 도출하는 개념이다.

도출된 최적 간격과 관입깊이 조건에서 픽커터의 작용력 역시 LCM 실험이나 예측식을 사용하여 계산하고 이를 통해 로드헤더의 소요 추력, 토크, 동력 등을 산출한 다음, 그림 4(f)로 추정되는 커팅헤드의 최대 토크 용량과 비교한다. 이후 그림 4(g)에 의해 커팅헤드의 구동 회전속도(RPM)를 추정한다.

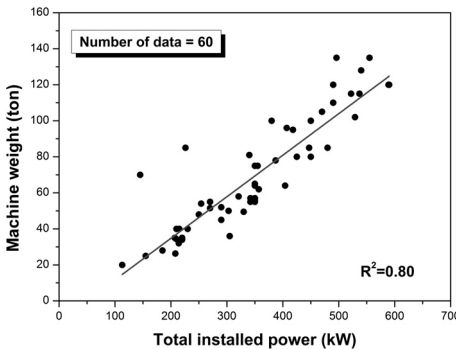
이상과 같은 과정을 통해 로드헤더의 최대 핵심 사양과 커팅헤드의 배열 설계가 이루어지면, 로드헤더의 가동율과 작업시간을 가정하여 로드헤더의 순굴착속도, 굴진율 및 픽커터의 소모량을 예측하는 식들로부터 예측 값을 계산하는 것으로 로드헤더의 설계를 완료한다.



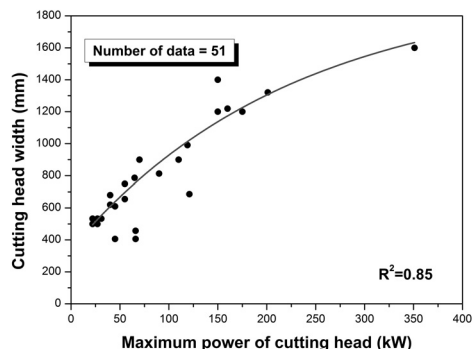
(a) 전체동력-터널단면적



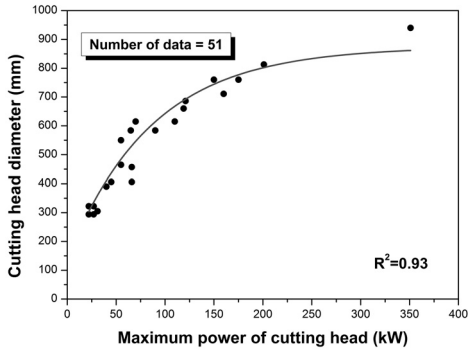
(b) 전체 동력-일축압축강도



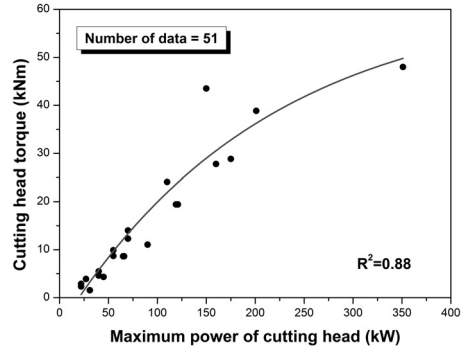
(c) 장비중량-전체동력



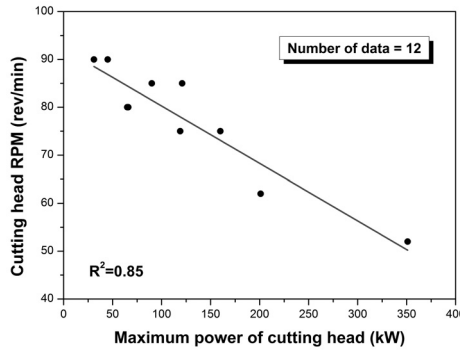
(d) 커팅헤드 폭-커팅헤드 최대동력



(e) 커팅헤드 직경-커팅헤드 최대동력



(f) 커팅헤드 토크-커팅헤드 최대동력



(g) 커팅헤드 RPM-커팅헤드 최대동력

그림 4. 로드헤더 핵심사양 간의 상관관계

3.2 설계시스템

데이터베이스 기반 로드헤더 커팅헤드 설계시스템의 기본적인 입력 및 출력은 그림 5와 같다. 좌측 프로젝트 입력창에서 프로젝트에 대한 입력 및 관리를 수행할 수 있으며, 각 프로젝트에 대해 우측 입력창에서는 터널 굴착단면적, 암석의 역학적-물리적 특성, 작업조건 등과 같은 설계자료의 입력에 따라 데이터베이스 모델을 기반으로 입력조건에 적합한 로드헤더의 사양을 추정하도록 되어있다. 더불어 장비의 사양에 따라 예상되는 굴착성능 (m^3/hr and m^3/day)을 산출하고 암석의 석영 함유량에 기초하여 픽커터의 마모 수명($picks/m^3$, $pick/m$)을 예측한다.

픽커터의 배열을 위해서는 픽커터의 관입깊이(P), 픽

커터의 간격과 관입깊이의 최적 비율(S/P_{opt}), 수평선상의 픽커터 간격(C_n), 수평선상에 위치한 픽커터의 간격(C_s), 수직선상의 픽커터의 기본 간격(S_l), 수직선상에 위치한 픽커터의 간격(S_c) 등을 입력하며, 이때 픽커터의 관입깊이와 최적의 절삭조건은 실물 절삭실험이나 실험모델을 통해 구할 수 있다. 하지만 픽커터의 수평 및 수직 간격은 다소 경험적으로 결정되는 경향이 있다. 픽커터 배열 설계 입력자료에 기초하여 픽커터 배열을 위한 좌표가 계산되면 그림 6과 같이 픽커터의 배열결과를 2차원 및 3차원으로 표현할 수 있으며, 배열설계 결과를 스프레드시트(spread sheet) 및 캐드(CAD, Computer Aided Design) 파일 형태로 저장이 가능하다.



신기술 신공법

프로젝트 입력 및 관리 **자료 입력** **장비 사양 자동 산출** **픽커터 배열 산출**

소요 장비 자동 산출 및 픽커터 소모량 산출

장비 (Arm Unit) 자동 산출

Geometrical Layout of a Cutting Head

Arm Unit	Number	X	Y	Z
1	0	0	2.195	256.45
2	30	20	6.3716	354.8
3	60	40	10.5472	352.95
4	90	60	14.7228	348.02
5	120	80	18.8984	340.31
6	150	100	23.074	329.74
7	180	120	27.2496	316.4
8	210	140	31.4252	300.37
9	240	160	35.6008	281.68
10	270	180	39.7764	260.34
11	300	200	43.952	236.36
12	330	220	48.1276	209.74
13	360	240	52.3032	180.47
14	390	260	56.4788	149.55
15	420	280	60.6544	117.0
16	450	300	64.83	82.81
17	480	320	69.0056	47.0
18	510	340	73.1812	0.0
19	0	330333330	134.262	288.59
20	30	767	127.432	216.67
21	60	1507	118.018	152.11
22	90	2247	107.906	97.55
23	120	2987	97.394	52.99
24	150	3727	86.882	8.43
25	180	4467	76.37	-37.13

Performance Prediction

Max	Average	Min	Average	Min
300 kW	100.303	36.497	725.817	509.204
132 kW	18.967	0.451	126.901	60.888

Cutting performance (inch/ft)

Max	Average	Min	Average	Min
300 kW	100.303	36.497	725.817	509.204
132 kW	18.967	0.451	126.901	60.888

Pick Cutter Consumption

Cutter consumption (inch/ft)	Cutter consumption (inch/ft)
0	0.00
30	0.63
60	0.14
90	0.13

그림 5. 로드헤더 커팅헤드 설계시스템의 입/출력

픽 커터 배열 결과 (2차원 및 3차원) **설계 결과의 저장 (Excel, AutoCAD 등)**

그림 6. 픽커터 배열 결과

DB 검색 모듈(커팅헤드) **DB 검색 모듈(픽커터)**

그림 7. 로드헤더 커팅헤드 설계시스템의 D/B검색 모듈

또한 커팅헤드 1차 설계시스템은 1차년도에서 구축한 143개의 커팅헤드와 213개의 픽커터에 대한 D/B를 모듈화하여 포함하였기 때문에 필요한 커팅헤드 사양과 픽커터를 검색할 수 있도록 구성되어 있다(그림 7).

4. 결론

본 기술은 친환경적이고 안전한 암반 굴착을 위해 전 세계적으로 적용이 증가하고 있는 로드헤더의 커팅헤드 설계시스템에 대한 것으로 우리나라에 로드헤더와 관련된 기술자료가 부족한 점을 고려할 때 본 기술에서 제안하고 있는 로드헤더의 최적선정과 핵심 설계항목의 산출방법은 향후 로드헤더 사양 선정에 유용한 자료가 될 수 있을 것이다. 특히 본 기술에서 제안하는 로드헤더의 설계를 위한 전체적인 설계절차 제시와 설계절차에 따라 데이터베이스에 기반하여 로드헤더의 핵심사양을 개략적으로 산출하고 커팅헤드의 설계에 있어서 가장 중요한 최적의 커터 간격과 커터 관입깊이의 비율을 TBM의 경우와 마찬가지로 실험이나 데이터베이스에 기반한 예측식들을 통해 도출하는 점은 향후 국내 로드헤더 설계기술의 발전에 기여할 수 있을 것이다. 마지막으로 데이터베이스의 신뢰성을 높이기 위한 추가적인 자료 수집 및 분석이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Pichler, J., 2011, Mechanical excavation of tunnels with Roadheaders, Lecture note, Post graduate master course – Tunnelling and Tunnel Boring Machine, Politecnico Di Torino, 1–78.
2. Rostami, J., 2013, Cutterhead Design Procedures and Performance Evaluations for Roadheader, Final report submitted to Korea Institute of Construction Technology, August 2013, Jamal Rostami Engineering Services LLC.
3. Rostami, J., L. Ozdemir, D.M. Neil, 1994, Application of Heavy Duty Roadheaders for Underground Development of the Yucca Mountain Exploratory Study Facility, High level radioactive waste management, Proceedings of the 5th Annual international conference, Vol. 2, 395–402.
4. Tatiya, R.R., 2005, Surface and Underground Excavations – Methods, Techniques and Equipment, A.A. Balkema, 237–244.
5. Tunnel Business Magazine, 2011, Roadheaders in Hard Rock – East Side Access Among North American Projects Employing Roadheader Technology, February 2011, 20–21.