

싱가포르 포트캐닝 전석층에 적용된 EPBM의 설계 및 시공

김욱영*, 노승환, 노상림

A Design and Operation of EPBM Applied in Fort Canning
Boulder Bed of Singapore

Uk Young Kim*, Seung Hwan Noh, Sang Rim Noh

Abstract This paper introduces the design and operational considerations for TBM tunneling in boulder bed which poses significant problems in terms of advance rate and machine wear. Managing these problems is difficult since normal soil investigation techniques do not accurately predict the presence and frequency of boulders. This has leads to considerable extra costs and delays during construction. In this paper, EPBM design and operational parameters, cutter wear characteristics and soil conditioning method in soft ground condition were studied and key successes were highlighted for future projects in similar ground condition.

Key words Tunneling in boulder bed, EPBM design, Cutter wear, Soil conditioning

초 록 본 논문은 TBM을 이용한 터널 굴착에서 커터의 마모 및 파손, 그에 따른 굴착속도 저하와 커터교체에 따른 공기 지연 등으로 인하여 프로젝트 전반에 심각한 영향을 미치는 전석층 지반 터널링에 관한 내용으로, 매우 조밀하고 단단한 상태의 점토지반에 강한 강도를 지니는 암석을 포함하는 싱가포르 포트캐닝 볼더베드(Fort Canning Boulder Bed, FCBB)에서의 터널링 경험을 바탕으로 볼더층을 통과하게 되는 토압식 쉘드TBM의 설계 및 시공 시 고려해야 할 주요 사항 및 볼더지반에서의 커터 마모 및 파손 특성, 점토 및 암석이 혼재된 지반에서의 쏘일 컨디셔닝 등의 내용을 기술하였으며, 향후 유사 지반에서의 터널링 프로젝트에 참고가 되길 기대한다.

핵심어 볼더지반 터널링, 토압식 쉘드TBM 설계, 커터 마모, 쏘일 컨디셔닝

1. 서 론

터널공사에서 만날 수 있는 다양한 지반 중 볼더층(Boulder Bed)은 토사와 암반이 혼재하는 지반의 불균질 특성과 볼더의 위치를 예측할 수 없는 불확실성 등으로 인하여 TBM을 이용한 터널링에 가장 불리한 지층으로 알려져 있다. 이에 반하여, 볼더를 포함한 지반에서의 TBM의 설계 및 시공에 대한 기술적 정보는 TBM공법을 이용한 지하철 공사의 경험과 실적이 많은

싱가포르에서도 도심지역 일부에만 존재하는 볼더층의 제한적 분포 특성 때문에 관련 사례를 찾기가 매우 어렵다. 이에 본 고에서는 싱가포르 도심철도 3호선(Downtown Line 3) C937 프로젝트에서 토압식 TBM(이하 EPBM)을 이용하여 볼더층을 통과한 사례를 소개함으로써, 향후 볼더층을 통과하는 프로젝트에서의 TBM 장비 설계 및 시공에 도움이 되었으면 한다.

2. 프로젝트 개요 및 볼더 지반의 특성

2.1 프로젝트 개요

C937 프로젝트는 약 21 km에 이르는 도심철도 3호선(DTL3) 사업구간 중 마지막 1.6 km에 해당하는 공사로서, 포트캐닝 정거장(Fort Canning Station) 1개소와 개착터널 1개소, 그리고 약 1.3 km의 단선병렬 터널로 이루어진다(Fig. 1). 터널은 서측의 일부 개착터널

Received: Aug. 21, 2015

Revised: Aug. 31, 2015

Accepted: Sep. 15, 2015

*Corresponding Author: Uk Young Kim

Tel) +82221542372, Fax) +82221540087

E-Mail) uykim@gsconst.co.kr

GRAN SEOUL, 33, Jong-ro, Jongno-gu, Seoul, 110-130, Korea

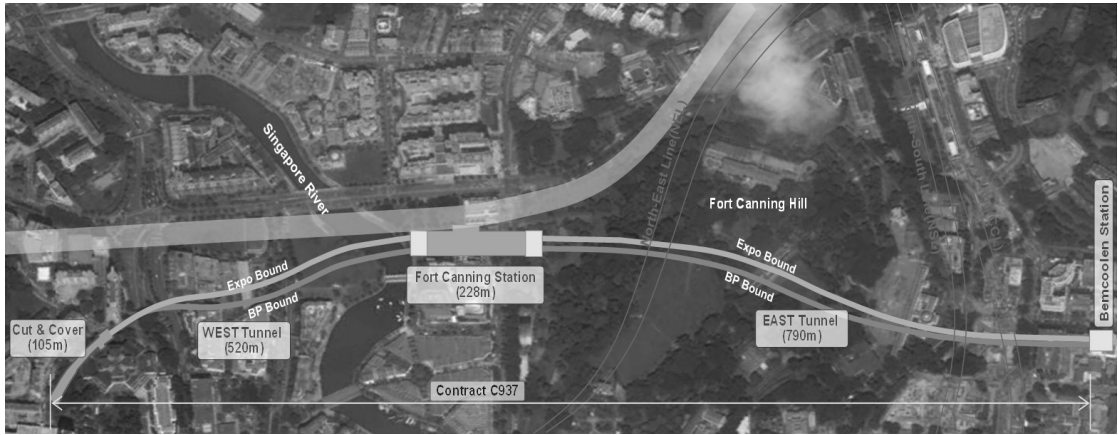


Fig. 1. Overview of C937 Project

Table 1. Characteristics of Fort Canning Boulder Bed

Design Parameters	Unit Weight	Effective Angle of Friction	Effective Cohesion	Undrained Shear Strength	Young's Modulus		Permeability
	γ	ϕ'	c'	c_u	Eu ²⁾	E' ³⁾	
unit	kN/m ³	Deg	kPa	kPa	MPa	MPa	m/s
value	21	32.5	10	5N ¹⁾ ≤ 500	300	E _w /1.2	10 ⁻⁸

¹⁾N=SPT blow count

²⁾Eu=Undrained Young's Modulus, ³⁾E'=Drained Young's Modulus

구간을 제외하고는 전 구간이 TBM터널이며, 포트캐닝 정거장을 중심으로 서측터널과 동측터널로 나뉜다. 총 520 m 연장의 서측터널은 주로 연약 점토층인 칼랑층(Kallang Formation)을 통과하며 1기의 TBM을 이용하여 왕복 굴착을 하였고, 약 790m로 비교적 연장이 긴 동측터널은 2기의 TBM을 이용하였으며, 주로 사암퇴적층인 주룽층(Jurong Formation)과 볼더층을 통과하였다.

2.2 볼더 지반의 특성

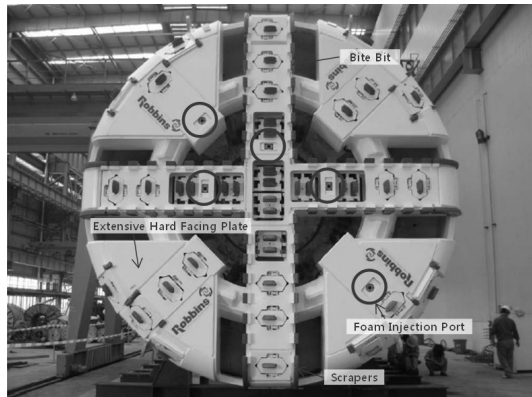
본 고에서 소개할 볼더층은 동측터널 구간에 위치하며, 동측터널 총 연장 1,585 m 중 약 40%에 해당하는 645 m에 이른다. 포트캐닝 볼더베드(Fort Canning Boulder Bed, 이하 FCBB)라고 불리는 이 지층은 싱가포르 서쪽 지역의 주룽층이 붕괴되어 형성된 지층으로 매우 단단한 사암이 조밀한 점토 퇴적물(clay matrix) 사이에 볼더 또는 호박돌(cobbles)의 형태로 혼재되어 존재하는 지층이다(Shirlaw et al., 2003).

현장의 지반조사보고서(Arup Singapore Pte Ltd, 2010, C937 Geotechnical Interpretative Baseline Report, 이하 GIBR)에 명기된 FCBB의 특성 및 주요 설계인자(design

parameter)는 Table 1과 같다. 일반적으로 FCBB에 포함된 볼더는 강도가 매우 강하며(최대 200MPa), 석영의 함유율이 높아(>60%) 마모율이 높은(very abrasive to quartzitic abrasive) 것이 특징이며, 볼더를 감싸고 있는 점토질 지반은 매우 견고하고(stiff) 조밀한(dense) 상태여서 투수 및 지하수 유출과 관련된 문제를 거의 유발하지 않고, 굴착 자립성 또한 매우 양호한 지반이다.

3. TBM장비 선정 및 제작 시 고려사항

TBM 장비 제작 시 가장 먼저 고려되어야 하는 사항은 장비의 형식을 선정하는 것이다. C937 프로젝트에서는 총 3기의 EPBM이 적용되었는데, 그 이유는 FCBB를 통과해야 하는 지반조건과도 관련이 있다. FCBB는 볼더를 포함하지만, 기본적으로는 점토질 지층이라고 할 수 있기 때문에 미립분의 함유량이 매우 높다. 따라서, 이수식 장비 적용 시 미립분 처리를 위한 이수처리 시설(Slurry Treatment Plant, 이하 STP)의 설치가 필요하며, 충분한 용량의 STP가 운영되지 못하여 이수의 처리속도가 늦어질 경우 굴진 속도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그러나 토압식 장비의 경우는 미립분의 함



(a) cutterhead without grill bar



(b) cutterhead with grill bar

Fig. 2. Cutting wheel design considerations for tunneling in Fort Canning Boulder Bed

량이 높을수록 스크류 컨베이어를 통한 막장압 관리가 용이한 장점이 있다. 또한, 볼더의 이송 처리에 있어서도 배니관에서의 막힘(clogging) 또는 마찰로 인한 배니관 파손 등을 유발할 수 있는 이수식 장비와 비교하여 배관을 사용하지 않는 토압식 장비가 유리하다. 경우에 따라 이수식 장비에 크러셔(crusher)를 도입하여 배니관의 막힘을 경감할 수 있지만, 챔버 안으로 유입되는 볼더의 크기가 큰 경우에는 크러셔의 효율이 떨어지며, 볼더 제거를 위한 별도의 인터벤션(intervention) 작업에 의해 공기가 지연될 가능성이 크다. 일반적으로 이수식 장비가 유리하다고 알려져 있는 지하수 유입 및 지반침하와 관련된 문제가 FCBB에서는 거의 발생하지 않으므로, 이러한 관점에서도 FCBB에서는 토압식 장비가 더 적합하다 할 수 있다.

장비 형식 선정 이후 장비 설계 단계에서 볼더층 통과를 위해 고려된 사항은 다음과 같다. 먼저 스크류 컨베이어가 처리할 수 있는 최대 볼더의 크기를 설정하였고, 설정된 크기 이상의 볼더가 챔버 내로 유입되지 않도록 면판(cutting wheel)의 개구율(opening ratio)을 제한하였다. 스크류 컨베이어의 날개 간격(screw pitch)을 420 mm으로 제작하여 최대 327.5 mm×655 mm 크기의 볼더를 처리할 수 있도록 하였으며, 개구율은 37% 수준으로 하여 굴착토가 챔버 내로 원활히 유입될 수 있도록 충분하게 하되, 챔버로 유입되는 볼더의 크기를 스크류 컨베이어가 처리 가능한 수준으로 제한하기 위해 Fig. 2와 같이 개구부에 300 mm 간격으로 강판(grill bar)을 설치하였다. 또한 스크류 컨베이어는 볼더 끼임 발생 시 역회전에 의한 볼더의 배출 및 재배치를 위해 양방향 회전이 가능하도록 제작하였다.

커터헤드(cutterhead)는 지반 변화에 따라 암반 굴삭

용 17" 디스크 커터(disk cutter)와 연삭용 굴착용 나이프 커터(knife cutter)를 혼용하여 장착할 수 있도록 제작하였고, 강도가 높은 볼더의 절삭 및 충격에 대한 손상 최소화를 위해 Extra heavy duty 등급의 경암용 디스크 커터와 카바이드 접착(cemented carbide) 비트를 장착한 나이프 커터를 사용하였다.

또한 면판에는 하드 페이스팅 강판(extensive hard facing plate)을 접합하여 볼더에 의한 면판의 마모 및 파손을 방지하였다. 면판은 굴삭 도구인 커터를 장착하는 하우징(housing) 역할을 하므로 굴진 종료 시점까지 손상이 되지 않도록 보호되어야 한다. 실드장비의 경우 후진이 불가능하거나 매우 제한적이어서 굴진 도중에는 면판에 대한 교체 및 수리가 어렵기 때문에, 마모가 심한 지질 굴착 시에는 면판에 대한 사전 보호 대책이 장비 제작 시 반드시 고려되어야 한다. 따라서, 하드 페이스팅 강판 등 면판 보호를 위한 직접적인 보강뿐만 아니라, 마모감지장치(wear detector) 등을 설치하여 면판 손상에 대한 예방 대책을 계획하였다.

쏘일 컨디셔닝(soil conditioning)은 흙의 성질을 조정함으로써 막장압 조절을 용이하게 하는 것이 주된 목적이지만, 볼더층에서는 마모 방지를 위한 윤활제(lubricant)로서의 역할이 더 중요하며, 특히 FCBB와 같이 점성이 높은 지반에서는 굴착토에 유동성을 부여함으로써 커터 토크를 저하시키는 목적으로 반드시 적용되어야 한다. 따라서 적절한 폼(foam)과 폴리머(polymer)등의 첨가제(additives)를 이용한 쏘일 컨디셔닝으로 커터와 면판의 마모를 줄일 수 있도록 계획하였다. 또한, 스크류 컨베이어로 유입된 볼더에 의한 막힘 방지를 위해 스크류 컨베이어에도 첨가제를 주입할 수 있는 장치를 설치하였다.

4. 볼더 지반에서의 TBM 터널링

4.1 커터의 선정 및 배치

총 42개로 구성된 커터는 외곽으로부터 총 10개의 게이지 커터(gauge cutter), 16개의 페이스 커터(face cutter), 16개의 센터 커터(center cutter)로 구성되며, FCBB 진입 직전에 해당 지층에 적합한 커터 배치를 위하여 인터벤션을 통한 커터 교체를 실시하였다. 커터는 강도가 높은 볼더의 절삭을 위하여 기본적으로는 디스크 커터 위주로 배치하였으며, 점토에 의한 막힘(clogging)으로 인하여 디스크 커터의 회전 및 효율이 떨어질 것으로 예상되는 중앙부 8개 센터 커터에만 나이프 커터를 적용하였다. 경우에 따라 이와 같이 디스크 커터와 나이프 커터를 혼용하여 배치하는 방식이 혼합지반 대응에 추천되기도 하나, FCBB와 같이 볼더 자체의 강도가 매우 강한 경우에는 디스크 커터의 적용이 더 합리적이라 할 수 있다. 따라서, C937 프로젝트의 경우에도 볼더층 진입 시 적용하였던 혼합커터 방식을, Fig. 3과 같이 지

반 내 볼더 비율이 증가함에 따라 모두 디스크 커터로 교체하여 굴진을 진행하였다.

4.2 커터의 마모, 손상 및 교체

약 625 m의 FCBB를 통과하는 동안, 총 7회의 인터벤션을 통하여 146개의 커터가 교체되었으며, 그중 마모에 따른 교체는 전체의 28%인 41개에 불과하였고, 대부분의 커터 교체는 디스크링(disc ring)의 균열, 파손 및 탈락 등에 의한 손상 때문에 실시되었다(Table 2). 위치별로는 센터 커터 40개, 페이스 커터 51개, 게이지 커터가 55개 교체되었다. 커터의 절삭거리가 길어 교체 주기가 짧은 게이지 커터의 교체 수량이 다소 많았으나, 볼더층 굴착에서는 대부분의 커터 손상이 마모(wear)보다는 볼더에 의한 타격(hitting)에서 기인하기 때문에 커터 손상의 위치별 경향성이 뚜렷하지 않은 특징이 있다. 또한, 쏘일 컨디셔닝을 적절히 적용하더라도 센터커터 위치에서의 클로깅(clogging)을 완전히 방지할 수 없기 때문에 편마모를 비롯한 센터커터의 비정상 마모

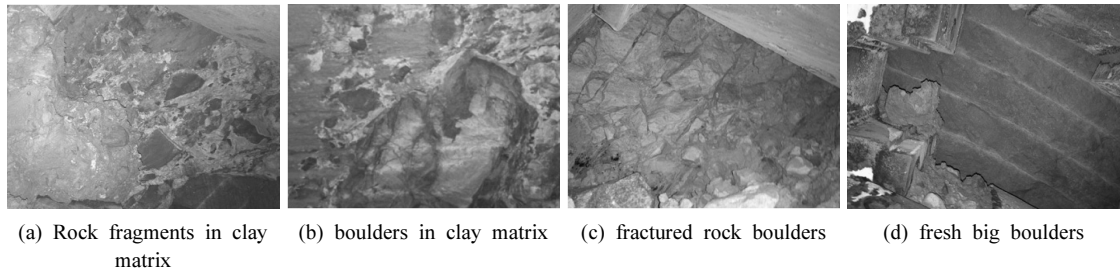


Fig. 3. Variety of boulder conditions in Fort Canning Boulder Bed

Table 2. Cutter exchange record in FCBB

Intervention	Bukit Panjang Bound			EXPO Bound				Total	
	1 st (planned)	2 nd (unplanned)	3 rd (unplanned)	1 st (unplanned)	2 nd (planned)	3 rd (unplanned)	4 th (unplanned)		
Distance from previous intervention	154.2 m	74.3 m	75.6 m	105.4 m	36.3 m	89.7 m	89.6 m	625.1 m	
Cutter Exchange	Center (#1~16)	16 ¹⁾ (2/14) ²⁾	6 (4/2)	2 (0/2)	8 (0/8)	4 (0/4)	4 (0/4)	-	40 (6/34)
	Face (#17~32)	16 (3/13)	2 (1/1)	4 (0/4)	4 (1/3)	16 (7/9)	-	9 (0/9)	51 (12/39)
	Gauge (#33~42)	10 (3/7)	4 (2/2)	9 (0/9)	5 (2/3)	10 (7/3)	7 (5/2)	10 (4/6)	55 (23/32)
Total	42	12	15	17	30	11	19	146	

¹⁾Total number of cutter exchange

²⁾(cutter exchanges from cutter wear/cutter exchanges from crack or breakage)

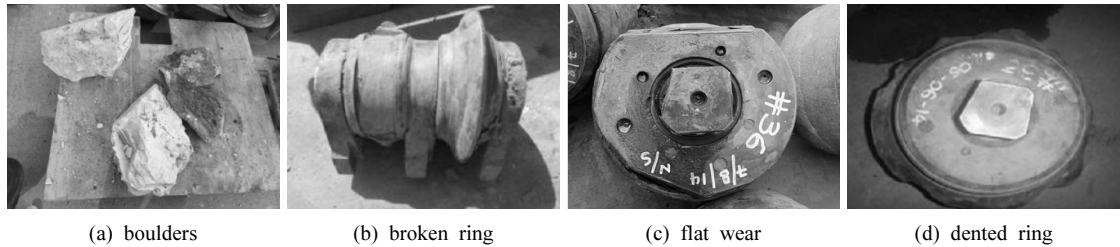


Fig. 4. Various cutter damages by boulder

및 링 균열에 의한 탈락 등이 다수 발생하였다(Fig. 4).

4.3 쓰일 컨디셔닝

굴착토에 대한 쓰일 컨디셔닝은 앞서 언급한 바와 같이 커터의 마모 방지뿐만 아니라 커터 토크의 경감 및 스크류 컨베이어를 이용한 막장압 조절 용이성 측면에서 FCBB 지반에서는 필수적이라 할 수 있다. 쓰일 컨디셔닝은 일반적으로 물에 혼합한 폼 에이전트(foaming agent) 용액(foam solution)을 공기주입기(air generator)를 이용하여 커터헤드에 연결된 주입구를 통해 막장으로 주입하는 방식을 사용하며, C937 프로젝트의 경우는 총 5개의 주입구가 커터헤드에 설치된 장비를 사용하여 주입구 별로 필요한 종류 및 양의 컨디셔너를 주입할 수 있도록 하였다. 경우에 따라서는 커터헤드 개구부 막힘이나, 중앙 로터리 조인트(rotary joint)에서의 점토 협착으로 토크가 증가되고 굴착효율이 떨어지게 되는데, 이때는 폼(foam) 주입을 대신하여 분산 성능을 가진 폴리머(polymer)를 주입하거나 분산제(dispersant)를 커터헤드 또는 챔버에 직접 투입하는 방법을 적용하였다.

FCBB의 통과를 위해서 폼의 주입율(Foam Injection Ratio, FIR)을 최소 30% 이상으로 적용하였고, 배토되는 흙의 상태에 따라 50%까지 증가시켰으며, 공기 주입율(Foam Expansion Ratio, FER)은 챔버가 굴착토 대신에 압축공기로 일정 비율 이상 채워지는 것을 방지하기 위하여 2~3 수준으로 최소화하여 적용하였다.

4.4 시공 관리

FCBB의 터널링이 난해한 이유는 전혀 반대의 굴착 특성을 지닌 연질의 점토층과 고강도 암석이 섞여 있는 상태의 혼합지반이라는 점과, 볼더의 크기 및 출현위치, 빈도를 전혀 예상할 수 없다는 데 있다. 따라서, 시공관리도 이와 같은 불확실성을 염두에 두고 이루어졌는데, 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 볼더의 타격에 의한 커터 손상을 최소화하기 위하여, 굴진속도는 15 mm/min 수준 이하로 느리게 진행하고, 커터헤드의 회전속도(rpm) 또한 1.5~2.0 이하로 운용함.
- 스크류 컨베이어에 볼더가 끼인 경우에도 원활한 배출이 가능하도록 폼 또는 폴리머 주입선을 스크류 컨베이어 연결하여 상시 주입이 가능하도록 하고, 필요 시 볼더의 직접 제거가 가능하도록 유지관리창(maintenance hatch)을 설치함.
- FCBB는 견고한 점토로 이루어져 있어 붕락의 위험은 없지만 굴착 후 변형은 유발하는 지층이므로 인터벤션 등에 의하여 굴진이 장기간 중지될 경우에는 주변지반의 변형에 의한 장비의 끼임이 발생할 수 있음. 이를 대비하여 실드 외면에 벤토나이트 등을 주입함으로써 재굴진 시 실드 외면의 마찰을 줄이고 비정상적인 추력의 발생을 방지함.
- 크기가 큰 볼더 및 탈락된 커터 링 등이 챔버 내에서 배출되지 못한 채 장기간 회전할 경우, 추가적인 커터의 손상을 유발할 수 있으므로 굴진 중 챔버로부터의 소음 관측 등을 통한 시공관리와 마모 감지기 확인, 주기적인 커터 인스펙션을 실시하여 커터의 대량 손상 및 연쇄적인 파손을 방지함.
- 볼더 지반의 불확실성으로 인하여, 설계 시 예상한 계획보다 커터 점검 및 커터 교체에 필요한 인터벤션의 횟수가 증가할 가능성이 많으므로, 이에 대한 비용 및 작업지연을 미리 예측하여야 함. C937 프로젝트의 경우에도 총 5회에 걸쳐 계획되어 있지 않았던 추가 인터벤션(unplanned intervention)이 실시되었고, 이에 따른 작업지연이 전체 굴착 공기의 약 16%를 차지하였음.

5. 결론

본 고에서 소개한 FCBB는 싱가포르의 Circle Line(CCL)

등 기존 지하철 건설을 위한 터널링 당시 평균 2.7~2.8 m/일(약 2링/일)의 평균 굴진율을 보인 매우 난해한 지층이라 할 수 있다(Osborne et al., 2008). C937 프로젝트에서는 초기 단계에서부터 볼더층 통과를 고려하여 장비의 선정 및 제작을 하였으며, 볼더를 고려한 커터의 선정 및 배치, 주기적인 커터 인스펙션 및 인터벤션을 통한 적절한 타이밍에서의 커터 교체, 마모 방지를 위한 쓰일 컨디셔닝 및 볼더에 대응하기 위한 장비운용 등 다양한 방법을 통하여 기존 사례대비 향상된 수준인 4.9 m/일(약 3.5링/일)의 일굴진율을 달성할 수 있었다. 본 고에서 소개한 내용들이 모든 볼더를 포함하는 지반에 동일하게 적용할 수는 없겠지만, 향후 유사 지층에서의 TBM 터널링에 유용한 참고자료가 될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Arup Singapore Pte Ltd, 2010, C937 Geotechnical Interpretative Baseline Report.
- Shirlaw J.N., P.B. Broms, S Chandransegaran, J. Daley, K. Orihara, G.V.R. Raju, S.K. Tang, I.H. Wong, K.S. Wong and Kyi Yu, 2003, The Fort Canning Boulder Bed, Underground Singapore 2003.
- Osborne N.H., C. Knight Hassell, L.C. Tan and R. Wong, 2008, A review of the performance of the tunneling for Singapore's circle line project, World Tunnel Congress 2008. Vol 3, 1497-1508.

김 욱 영



2000년 고려대학교 공과대학 토목환경
공학과 공학사
2002년 고려대학교 공과대학 토목환경
공학과 공학석사

Tel: 02-2154-2372
E-mail: uykim@gsconst.co.kr
현재 GS건설 기술본부 지반팀 과장

노 승 환



1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2004년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학과 공학석사

Tel: 02-2154-2394
E-mail: shnoh@gsconst.co.kr
현재 GS건설 기술본부 지반팀 과장

노 상 립



1996년 인하대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1998년 인하대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2002년 인하대학교 공과대학 자원공학과
공학박사

Tel: 02-2154-2358
E-mail: slno@gsconst.co.kr
현재 GS건설 기술본부 지반팀 부장