

대심도 터널 암반 절리 보강을 위한 고점도 그라우팅 재료의 특성

Characteristics of High-viscosity Grouting Materials for Rock Joint Reinforcement of Deep Tunnel

윤 인 국¹⁾ · 문 준 호²⁾ · 이 준 수³⁾ · 김 영 옥[†]

Inkook Yoon · Junho Moon · Junsu Lee · Younguk Kim

Received: November 5th, 2021; Revised: November 10th, 2021; Accepted: November 23rd, 2021

ABSTRACT : This study presented the characteristics and additive effects of the grout with mixing ratio for developing of high-efficiency grouting technology under high depth conditions. The laboratory investigation were conducted with Portland cement (OPC) and micro cement (S8000-E) including viscosity experiments, particle size analysis experiments, Gel-Time experiments and uniaxial compressive strength experiments. As a result of the viscosity experiment, it was shown that OPC is advantageous in terms of viscosity, but S8000-E is suitable when considering the passage of rock joint intervals through particle size analysis. The Gel-Time experiment shows that it is not that difficult with injection as a grout material even when silica fume (SF) was applied. The strength of the cured material is improved as increase in the content of silica fume (SF). Within the range of the study, the optimal mixing ratio obtained through various experiments is S8000-E, w/c=70%, silica fume (SF)=6%, and 7 days.

Keywords : Grouting, Cement, Silica fume, Mixing ratio, Great depth

요 지 : 본 연구는 대심도 조건의 고효율 그라우팅 기술개발을 위한 그라우트재 배합비를 제시한 것으로서 연구에 사용된 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 마이크로 시멘트(S8000-E)의 배합별 특성과 첨가제 효과를 점도 실험, 입경분석 실험, Gel-Time 실험, 일축압축강도 실험을 통해 확인하였다. 점도실험 결과 점도적인 측면에서 고려하였을 때 OPC가 유리하지만 입경 분석을 통한 암반 절리 간격 통과 고려 시 S8000-E가 적합하다는 것을 확인할 수 있었다. Gel-Time 실험 결과 OPC보다 S8000-E에서 효율적인 값을 나타내었으며 실리카폼(SF) 적용 시에도 그라우트재로서 주입에는 문제가 없음을 확인하였다. 일축압축강도 시험결과 실리카폼(SF) 함유량 증가에 따른 강도 증진 효과 및 양생시간에 따른 압축강도 변화를 확인하였으며 여러 가지 실험을 통해 선정된 최적의 배합비는 S8000-E, w/c=70%, 실리카폼(SF)=6%, 7일 양생으로 대심도 조건의 고효율 그라우트재로서 주입에 가장 효과적인 것으로 판단된다.

주요어 : 그라우팅, 시멘트, 실리카폼, 배합비, 대심도

1. 서 론

도시가 팽창하고 도로나 철도를 놓을 수 있는 공간이 한정적인 상황에서 대심도 개발은 필수적이다. 개발에 앞서 지반의 보강 등을 위해 대심도 환경에 맞는 그라우팅 기술 개발은 선제적으로 해결되어야 한다. 우리나라는 현재 지하 40m 이하 깊이에 있는 공간을 대심도라 지칭하고 있다. 대심도 개발을 위해서는 굴착 시 붕괴, 굴착 저면의 용기방지, 굴착면의 토압경감 등 위험발생이 예상되는 지반 및 암반에 그라우팅 적용이 필요하다(Kim, 2011). 시공 중 굴착면 붕괴가 발생하였을 경우, 붕괴와 함께 다량의 지하수 유입이 발생할 수 있는 가능성이 크기 때문에 대심도 환경에 맞는 지반 차수 및 보강공법의 개발은 필수적이다.

수압이 작용하지 않는 지하수위 상부에서 시공되는 기존 그라우팅과 달리 지하수위 아래 대심도 조건이나 해저 조건에서 그라우팅을 수행해야 하는 경우, 높은 정수압을 받게 되고 그라우팅 효율이 떨어져 주입압력 등을 추가적으로 고려해야 한다. 또한 깊은 심도에서 이루어지는 특성상 상재압의 영향도 상대적으로 크게 발생하므로 다양한 영향인자를 고려하여 설계 및 시공이 수행되어야 한다(Jeon et al., 2017).

국내에서는 대심도 개발에 앞서 문제에 직면한 반면, 노르웨이, 핀란드, 스웨덴과 같은 북유럽 국가에서는 고효율(고압·고점도) 그라우팅 연구가 1990년대부터 현재까지 꾸준히 이루어져 왔다.

본 연구에서는 대심도 조건에서 고효율 그라우팅 기술개발 이전 단계인 고점도 그라우팅 재료를 선정하고 배합비를

1) Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

2) Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

3) Undergraduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

† Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University (Corresponding Author : yukim@mju.ac.kr)

제시하여 Barton의 암반 절리면 주입이론에 적용하여 재료의 적용 가능성 여부를 검토하고자 한다.

2. 그라우팅 이론

2.1 그라우팅 주입 이론

암반 절리면에 그라우트재를 주입하기 위해서는 암반 절리 간격을 통과할 수 있는 재료의 입경 크기가 중요하다. 입경이 큰 시멘트를 사용한다면 절리면 틈새의 간격을 통과하지 못할 수도 있으며 반대로 초미립자 시멘트 같이 입경이 매우 작 으면서 뭉침현상이 발생하게 되면 절리면 통과가 불가능 할 수도 있다(Barton, 2004b). 따라서 암반의 절리 간격을 통과할 수 있는 재료와 적합한 배합비를 산정하는 것이 중요하다.

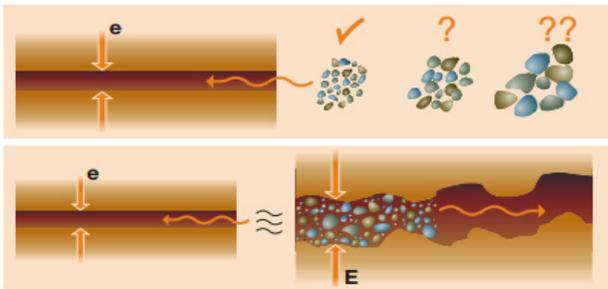


Fig. 1. e and E depending on the roughness of the joint (Barton, 2004a)

재료 선정에 앞서 암반의 절리 간격 산정을 위해선 평균적인 조인트 간격(E)은 암반의 거칠기 계수(JRC)에 기반하여 구할 수 있으며, Eq. (1)에 나타나있다(Barton et al., 2001).

$$E \approx \sqrt{e \times JRC^{2.5}} \quad (1)$$

암반 조건에 맞는 평균 조인트 간격을 산정한 후 선행된 연구를 통해 얻어진 조인트 간격과 시멘트 입자 크기의 관계식은 Eq. (2)를 사용하여 암반 절리 간격 통과 가능 여부를 판단할 수 있다.

$$E \geq 4D_{95} \quad (2)$$

여기서, D95는 시멘트의 95% 통과 입경이 조인트 간격 (E)보다 4배 정도 작아야 한다는 것을 의미한다.

국내에서 대심도라는 기준은 명확하지 않으나 현재까지 상용되는 의미는 지하 40m 이하의 심도로 알려져 있으며 Fig. 2를 참고하여 조인트 간격은 138 μ m로 설정하였다.

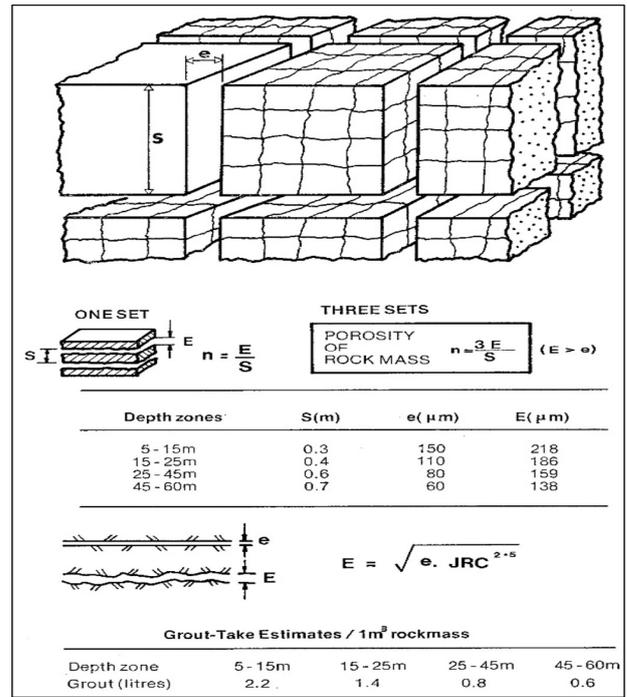


Fig. 2. Cubic network (Barton et al., 2019)

3. 실험재료

연구에 사용된 주입재 중 A액은 규산나트륨과 물의 보편적인 성질을 가지며 주로 토목, 건축의 공사 등에 많이 사용되는 1종 보통 포틀랜드시멘트(OPC)와 초미립자로 연약지반의 주입재, 암반 균열 그라우팅 등에 주로 적용되는 마이크로 시멘트 S8000-E를 각각 구분하여 B액으로 사용하였다. 분말도는 OPC=2,800cm²/g, S8000-E=8,000cm²/g 으로 시멘트와 혼합 시 강도 발현을 증대시킬 수 있는 실리카폼(SF)을 첨가제로 사용하였다. 실리카폼(SF)은 평균 입자 0.15 μ m로 완전 구형에 가까운 입자이며 비정질의 활성 실리카로서 수산화칼슘과 반응하여 상온에서 함수규산 카복시기로 변화해 포졸란 성질을 띤다(Kim et al., 2013). 일반적으로 시멘트 중량의 3~10%를 혼합해 사용하며 사용량에 따라 물성이 변하므로 충분한 사전 실험을 통해 최적의 사용량을 결정하는 것이 바람직하다.

4. 실험방법 및 실험결과

4.1 점도

OPC는 w/c=50~100%, S8000-E는 w/c=70~100%로 분류하여 실험하였다. S8000-E에서 w/c=50%와 60%는 분말도가 높고 물과의 반응속도가 빠르게 진행되어 점도측정이 불가능하

고 주입재로서 부적격하다고 판단하여 배제하였다. 주입재의 증량은 모두 동일시켰으며, 배합 후 교반시간을 일정하게 하여 Brook Field Rheometer를 이용해 점도를 측정하였다.

S8000-E은 분말도가 높아 w/c=50, 60%에서는 점도가 측정이 되지 않았다. OPC와 S8000-E 모두 w/c가 증가함에 따라 점도는 감소되는 반비례 관계를 보였으며, w/c=70%에서 OPC와 S8000-E의 점도 차이가 가장 크게 나타났다. 상대적 비교를 위해 측정된 물과 기름의 점도보다 두 시멘트의 점도가 높은 것으로 분석되었으며, OPC w/c=50%와 S8000-E w/c=70%에서 비슷한 수치의 점도를 나타내었다. OPC의 경우 w/c=50%와 60% 사이의 점도 변화 폭이 가장 큰 것으로 나타났으며, S8000-E는 w/c=70%와 80% 사이의 변화폭이 가장 큰 것으로 나타났다.

OPC가 S8000-E에 비해 입경 분포가 크며 분말도가 낮아 대체적으로 S8000-E에서 점도가 높게 나온 것을 확인할 수 있다.

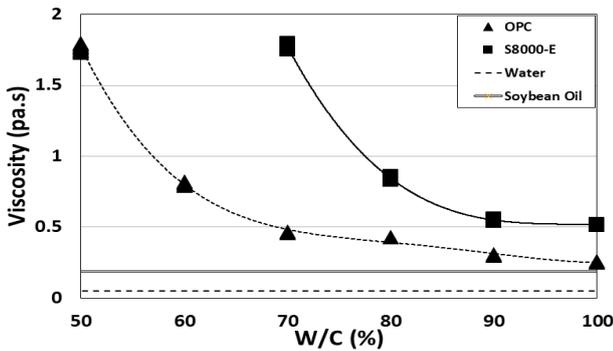


Fig. 3. Viscosity of the injection material by mixing ratio

4.2 입경 분석

입경 분석 실험은 점도 실험을 통해 두 주입재를 비교할 수 있는 비교적 고점도 상태인 w/c=70%로 배합을 통일한 뒤 실험을 진행하였으며 점도 실험과 동일한 조건으로 교반 후 입경 분석기(Ls 230)를 이용해 입자의 크기를 측정하였다.

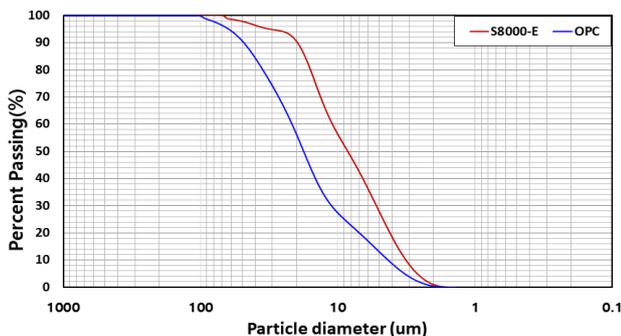


Fig. 4. Injection material particle size distribution curve

Table 1. Injection material particle size analysis

	OPC	S8000-E
D50 (μm)	19.49	9.319
D90 (μm)	52.94	21.76
D95 (μm)	63.41	33.01
Dmax(μm)	161.2	133.7
Mean (μm)	25.19	12.78
Median (μm)	19.49	9.319

OPC는 S8000-E에 비해 전체적으로 입경이 큰 것으로 나타났으며 $E \geq 4D_{95}$ 를 고려한 D95에서 OPC가 S8000-E보다 약 1.9배 큰 것으로 나타났다. 앞선 실험을 통해 점도적인 측면에서 OPC가 유리할 것으로 판단되었지만 입경 분석 결과 OPC는 질리면 보강재로 적합하지 않다고 판단된다.

4.3 Gel-Time

Gel-Time 실험에서는 OPC w/c=50~100%, S8000-E는 w/c=70~100%로 나누어 실험을 진행하였으며 실리카폼(SF)을 1~7% 혼합하여 측정하였다.

각 재료를 표준 배합 재료량에 준하여 초정밀 저울을 활용하여 0.01g까지 정확히 계량하였으며, Gel-Time 측정 시간적 변수를 제거하기 위해 한 사람이 측정, 주입재 종류에 따른 배합비별 고형화 특성 확인을 위해 Gel-Time을 측정하였다.

배합비별 Gel-Time 측정 결과, w/c의 증가에 따른 겔화 시간의 감소를 확인하였다. w/c 증가에 따라 특수 규산과의 혼합이 수월해져 위와 같은 결과값이 나온 것으로 확인되며 S8000-E의 경우 급결용 시멘트이므로 배합비에 따른 겔화

Table 2. Gel-Time

w/c (%)	OPC Gel-Time (s)	S8000-E Gel-Time (s)
50	53.27	-
60	32.37	-
70	36.16	14.21
80	26.40	14.46
90	21.07	15.00
100	22.50	13.60

Table 3. Gel-Time based on SF content w/c=70%

SF (%)	OPC Gel-Time (s)	S8000-E Gel-Time (s)
1	28.08	18.41
2	26.03	17.78
3	24.97	23.33
4	26.26	21.88
5	22.73	19.96
6	22.97	28.63
7	29.40	21.81

시간의 차이가 크진 않은 것으로 나타났다.

주입재의 유동성 및 입경을 고려하여 w/c=70%에 실리카 폼(SF) 함유량에 따른 실험 결과, 함유량에 따른 겔화 시간의 변화는 크게 없는 것으로 나타났다. 기존 실리카폼(SF)을 치환하지 않은 배합과 비교 시 겔화 시간이 증가하는 양상을 보였으나, 이는 급결 시간 고려 시 크게 영향을 미치는 요소가 아닌 것으로 분석된다.

4.4 일축압축강도

배합비에 따른 재료별 일축압축강도는 이전 실험들과 마찬가지로 OPC w/c=50~100%, S8000-E는 w/c=70~100%로 시험하였다. 규산나트륨과 물의 배합은 Gel-Time 실험과 동일하게 진행하였으며 실리카폼(SF)으로 인한 강도 증진 효과를 확인하기 위해 실리카폼(SF)=1~7%로 배합을 실시하였다. 일회용 종이 몰드에 공시체 제작 후 수온 20°C에서 3일, 7일 수중 양생 시켰으며 UTM으로 일축압축강도를 측정하였다.

w/c 증가에 따라 압축강도는 감소하며 수축율은 증가하는 것으로 나타났다. OPC에 비해 S8000-E의 압축강도가 높게 나타났으며 S8000-E의 강도발현이 잘되는 것으로 확인된다. 실리카폼(SF) 함유량에 따른 강도를 비교했을 때, OPC에 비해 S8000-E의 효과가 높은 것으로 나타났으며 w/c=70%에서 압축강도를 비교하였을 때, OPC=3.79Mpa, S8000-E=

11.60Mpa에서 SF함유 시 S8000-E에서 최소 약 2~3Mpa, 최대 8Mpa 증가하였다. 실리카폼(SF)=7%에선 OPC와 S8000-E 모두 강도가 감소되는 것으로 나타났으며, w/c=70%에서 실리카폼(SF) 함유량이 6%일 때 가장 강도 발현이 잘 되는 것을 알 수 있다.

양생시간에 따른 재료별 배합에 따른 압축강도를 비교한 결과, 전체적으로 3일 양생에 비해 7일 양생에서 높은 강도 값을 나타냈으며 OPC는 w/c=60%에서 3.38Mpa로 가장 큰 압축강도 차이를 나타내었다. S8000-E는 w/c=70%에서 3.13Mpa로 가장 큰 차이를 보였으며 OPC에 비해 S8000-E의 평균적

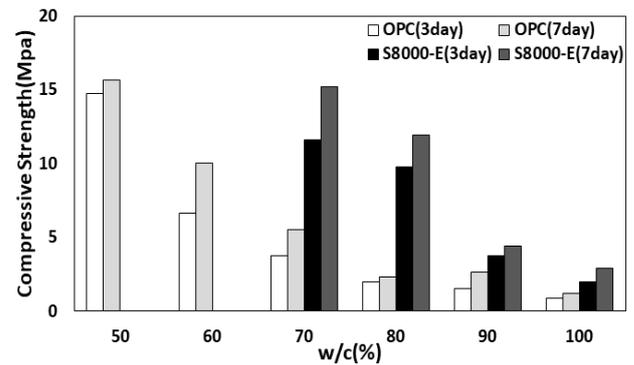


Fig. 5. Compression strength during curing period according to the ingredients mix

Table 4. Uniaxial compressive strength test according to w/c

w/c (%)	OPC		S8000-E	
	Compressive strength (Mpa)	Shrinkage (%)	Compressive strength (Mpa)	Shrinkage (%)
50	14.74	2.67	-	-
60	6.64	5.67	-	-
70	3.79	3.00	11.60	2.17
80	1.99	4.33	9.77	2.67
90	1.50	5.00	3.79	3.00
100	0.86	5.17	1.99	4.33

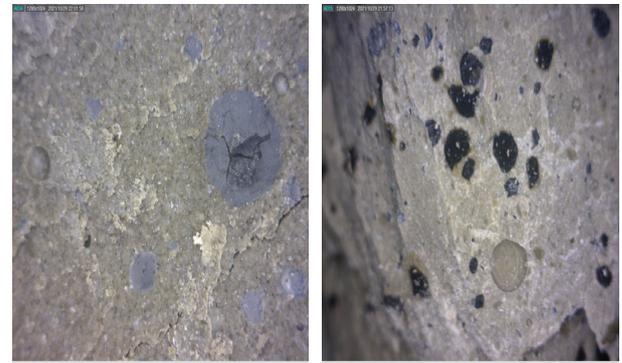


Fig. 6. OPC + SF Cross section Fig. 7. S8000-E + SF Cross section

Table 5. Uniaxial compressive strength test according to the silica fume (SF) content

w/c=70%	OPC		S8000-E	
	Compressive Strength (Mpa)	Shrinkage (%)	Compressive Strength (Mpa)	Shrinkage (%)
SF (%)				
1	4.423	3.67	14.13	2.83
2	4.73	4.33	18.50	2.67
3	4.48	4.00	18.51	2.33
4	4.83	3.33	16.69	2.50
5	5.55	3.67	18.50	2.50
6	6.43	3.83	19.61	2.33
7	5.20	4.00	16.40	2.67



Fig. 8. S8000-E + SF, OPC+SF, S8000-E, OPC, OPC (From the left)

인 압축강도가 1.71Mpa로 더 많이 증가한 것을 알 수 있다.

공시체의 단면을 전자현미경으로 비교한 결과 S8000-E는 3일 양생 시점에서 공시체 단면이 건조하며 OPC는 습윤한 상태였다. 실리카폼(SF)은 S8000-E에서 흑색, OPC에서는 회색을 띄며 이는 주입재의 수화열에 의한 탄소의 잔류, 연소와 관련이 있는 것으로 Fig. 6-8에 나와있다(Kim et al., 2008).

5. 결 론

대심도 조건의 고효율 그라우팅 기술개발을 위한 배합비 연구를 수행하였으며 재료선정을 위해 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 마이크로 시멘트(S8000-E)의 배합별 특성 및 첨가제 효과를 비교, 분석하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) OPC가 S8000-E에 비해 입경 분포가 크며 분말도가 낮기 때문에 대체적으로 S8000-E의 점도가 높게 측정되었다. 점도적인 측면에서는 OPC가 유리한 것으로 나타나지만 입경 분석 결과, OPC보다 S8000-E의 입경이 작게 측정되어 $E \geq 4D_{95}$ 를 고려했을 때 S8000-E가 그라우트재로서 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.
- (2) Gel-Time 분석 결과, OPC보다 S8000-E에서 Gel-Time이 2배 이상 감소하였으며, S8000-E에서 w/c의 증가에 따른 Gel-Time의 차이가 1초 이상 차이가 나지 않았고 실리카폼(SF) 적용 시 Gel-Time이 지연되거나 급결 시간이 30초 이내인 것을 고려하면 그라우트재로서 주입에 문제가 없을 것으로 확인된다.
- (3) 일축압축강도 시험은 w/c의 증가에 따라 강도가 감소하는 경향을 보였으며 실리카폼(SF) 함유량 증가에 따른 강도 증진 효과를 확인할 수 있었다. 양생시간이 길어질수록 주입재 모두 압축강도가 증가하였으며 OPC보다 S8000-E에서 양생시간에 따른 높은 압축강도 차이를 보였다. 실험으로 진행한 배합비의 실리카폼(SF)=7%에서 강도가 감소하며 실리카폼(SF)=6%일 때 가장 높은 강도가 발현되는 것으로 보아 S8000-E w/c=70% SF=6%

7일 양생 시 대심도 조건의 고효율 그라우팅 주입재로 가장 효과적일 것으로 판단된다.

- (4) 일축압축 강도 시험에서의 파괴된 공시체 단면을 비교 조사한 결과 실리카폼(SF)은 S8000-E에서 흑색, OPC에서 회색을 띄고 있으며 주입재의 수화열에 의한 탄소의 잔류 및 연소와 관련이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의(도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: 21UUTI-B157813-02) 지원으로 수행되었으므로 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Jeon, K. J., Oh, M. H. and Yuen, C. Y. (2017), An experimental study on grouting performance considering hydrostatic pressure, A collection of papers by the Korean Society of Geotechnical Engineering, Vol. 33, No. 10, pp. 49-58 (In Korean).
2. Kim, C. Y. and Kim, J. K. (2008), Hydration heat and autogenous shrinkage properties of silica-fume included mass concrete, Korean Concrete Society, No. 20, Vol. 2, pp. 489-492 (In Korean).
3. Kim, J. S. (2011), The behavioral characteristics of the cement penetration grouting method, Korea University, doctoral thesis (In Korean).
4. Kim, S. S. and Lee, J. B. (2013), The durability of silica fume concrete, Magazine of RCR, Vol. 8, No. 4, pp. 10-15 (In Korean).
5. Nick Barton, Bjorn Buen, Steniar Roald (2001), Strengthening the case for grouting, T&t international, Vol. 33, No. 12, pp. 34-36
6. Nick Barton (2004a), The Why's and how's of high pressure grouting-Part1, T&t international, Vol. 36, No. 9, pp. 28-30.
7. Nick Barton (2004b), The Why's and how's of high pressure grouting-Part2, T&t international, Vol. 36, No. 10, pp. 33-35.
8. Nick Barton, Eda Quadros (2019), Understanding the need for pre-injection from permeability measurements: What is the connection?, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 576-597.