

## 사면보강 공사시 관리 방안

### Plan of Construction Management for Reinforcement Method of Slope

박종호<sup>1)</sup>, Jong-Ho Park, 정희석<sup>2)</sup>, Hui-Seok Jeong, 이재덕<sup>3)</sup>, Jae-Duk Lee, 홍익표<sup>4)</sup>, Ik-Pyo Hong

<sup>1)</sup> 대원토질(주) 전무이사, Executive Director, Daewon Soil Co., Ltd

<sup>2)</sup> 대원토질(주) 부장, Department Manager, Daewon Soil Co., Ltd

<sup>3)</sup> 대원토질(주) 기술연구소 연구원, Reserchor, Daewon Soil co., Ltd

<sup>4)</sup> 대원토질(주) 기술연구소 연구원, Reserchor, Daewon Soil co., Ltd

**개요(SYNOPSIS)** : The construction road and addition work are increasing now. Therefore, slope stability is important in construction slope on the fault and fractured zone. Rock bolt method, soil nailing method and anchor method are applied to reinforcement method of slope.

This paper is the study for construction management on reinforcement method of solpe.

**주요어(Key words)** : Construction management, Slope reinforcement, Pressure grouting

## 1. 서 언

국토의 70% 이상이 산지로 형성되어 있는 국내 토목공사 현장에서는 자연사면을 절취하여 대절토 사면을 조성하는 경우가 많으며, 이때 지반의 지질학적 특성(토질의 종류 및 불연속면 상태 등) 및 기상조건의 변화영향 등으로 크고 작은 사면 붕괴가 자주 발생하고 있다. 이와 같은 사면붕괴를 사전에 방지하거나 이미 붕괴된 사면의 안정성을 향상시키기 위해서는 적절한 보강공법을 적용하게 된다.

표 1.1 사면보강공법의 종류

구 분	억지공법	억제공법
종 류	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rock Bolt 공법</li> <li>· Anchor 공법</li> <li>· Soil Nailing 공법</li> <li>· 억지말뚝공법</li> <li>· FRP 보강 그라우팅 공법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지표수 배제공법</li> <li>· 지하수 배제공법</li> <li>· 지하수 차단공법</li> <li>· 압성토공법</li> </ul>

사면안정공법은 주변의 환경적인 요인 등에 의하여 발생하는 지반의 강도 감소요인을 최소화시켜 현재상태의 안전율을 유지하거나 증가시키는데 목적있으며, 구조물이나 보강재 등을 이용하여 안전율을 증가시키는 사면활동 억지공법과 생화학적 혹은 물리학적 방법을 이용하여 안전율을 유지시키는 공법으로 구분할 수 있다.

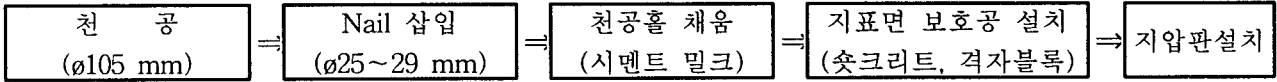
이 논문에서는 국내에서 자주 적용되고 있는 사면활동 억지공법 시공 중 발생할 수 있는 문제점과 관리방안에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 사면활동 억지공법

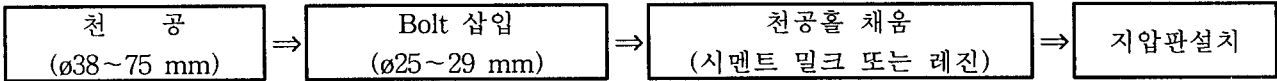
## 2.1 사면활동 억지공법의 시공순서

국내에서 사면보강용으로 자주 적용되고 있는 억지공법의 시공순서를 요약하면 다음과 같다.

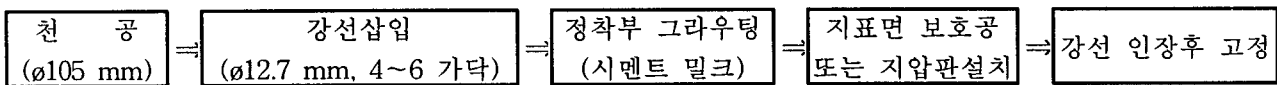
### (1) Soil Nailing 공법



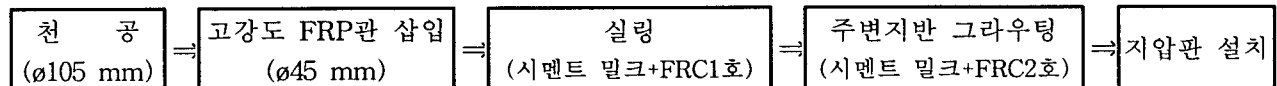
### (2) Rock Bolt 공법



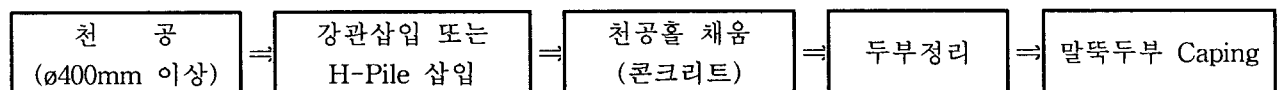
### (3) Anchor 공법



### (4) FRP 보강 그라우팅 공법



### (5) 억지말뚝 공법

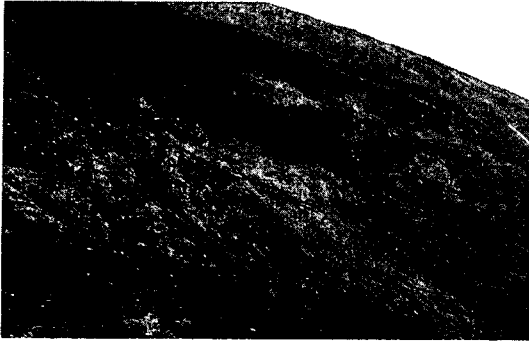


## 2.2 사면활동 억지공법의 중요 시공관리 사항

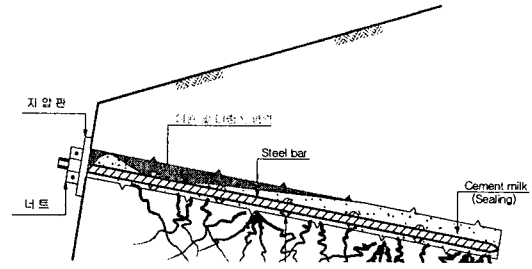
사면활동 억지공법 공사시 일반적인 시공관리 사항을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 천공은 계획된 규격 및 현장여건에 맞는 천공장비를 결정하여 천공을 실시해야 하며, 천공중 배출되는 Slime을 관찰하여 조사된 지반조건과 일치여부를 판단하여야 한다. 그러나 예상하지 못한 절리 및 파쇄대가 존재하는 경우에는 그라우팅 공정의 품질이 떨어져 시공품질을 저하시킬 수 있으므로 주의해야하며, 천공홀의 붕괴가 예상되는 경우에는 보강재의 삽입 및 그라우팅공정이 종료될 때 까지 천공홀을 유지시킬 수 있도록 케이싱 삽입 등 대책을 강구하여야 한다.

그라우팅 공정은 사면활동 억지공법의 시공품질을 좌우할 수 있는 가장 중요한 공정이다. 절리 및 파쇄대가 발달되어 있는 지반에서는 무압주입에 의해 시공되는 Rock Bolt 공법 및 Soil nailing 공법은 그림 2.1과 같이 절리 및 파쇄대로 그라우트재가 유실되어 이완 및 미충진 구간이 발생하여 보강재가 부식하거나 인발력이 확보되지 않아 잠재적으로 대규모의 붕괴를 유발시킬 수 있다. 또한 Anchor 공법에서 정착부의 그라우팅 품질저하로 설계 긴장력이 확보되지 않아 붕괴를 초래하는 경우도 있다. 따라서 Rock Bolt 공법 및 Soil nailing 공법은 무압 주입공정을 압력 주입공정으로 변경시공하면, 이완 및 미충진 영역의 발생을 억제하는 동시에 주변마찰력을 증가시켜 보강효과를 극대화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

억지말뚝 시공시 천공후 강관을 삽입할 경우에는 천공홀과 강관파일 사이가 제대로 충전되지 않아 천공홀의 붕괴, 지하수 침투, 보강재의 부식 및 원지반의 이완이 발생될 수 있으므로 천공홀과 강관파일 사이를 주입호스를 설치하여 추가로 그라우팅 하여야 한다. 따라서 천공 후 강관 삽입시 내부의 슬라임을 완전히 제거해야 하며, H-PILE 건입시 불연속면의 발달 상황을 확인하고 PILE의 단면계수를 고려하여 설치해야 한다.



Rock Bolt 공법 붕괴현장



Rock Bolt 공법 및 Soil Nailing 공법 부설시공 개요도

그림 2.1 Rock Bolt 공법 및 Soil Nailing 공법 부설시공

### 3. 그라우팅 공정의 시공관리

사면활동 억지공법의 시공관리 사항에서 공법의 품질을 좌우하는 가장 중요한 공정은 그라우팅이다. 이번 장에서는 압력 그라우팅공정에 관한 시공관리 방안에 대하여 논하고자 한다.

#### 3.1 주입압과 주입량 관리법

##### (1) 정압 주입방법

정압 주입은 주입시 압력을 일정하게 유지하도록 단위시간당 주입량을 조절하면서 주입하는 방법이다. 주입 압력은, 원칙적으로 주변에 악영향을 미치지 않는 범위 내에서 높은 압력을 주는 것이 효과적이다. 따라서 정압주입의 경우 제한 압력을 어떻게 결정하는냐에 따라 성패가 좌우될 수 있으며, 지나치게 낮으면 주입량이 적어 만족한 결과를 얻을 수 없게 된다.

##### (2) 정량 주입방법

정량 주입은 주입시 단위 시간당 주입량을 정하고 주입압력의 변화를 감시하면서 초기의 주입압력에 서 시작하여 주변지반에 악영향을 미치지 않는 범위까지 압력을 서서히 상승시키면서 주입을 계속하는 주입방식이다. 단위 시간당 주입량은 시험시공에 의해 결정하게 되는데 시공능력, 경제성을 고려하여 보통 토층에 대해서는 15~30ℓ/min 정도로 하는 것이 적당하다.

정량 주입방식의 문제점으로는 단위시간당 주입량을 많게 설정하면 초기에 과도한 압력이 상승하고 주변에 악영향을 미치게 되는 경우가 있으므로 주의를 요한다.

#### 3.2 자기기록계 이용관리법

자기기록계를 이용한 방법은 시간(T)과 주입압력(P) 그리고 주입량(Q)을 상호조정하면서 지반조건에 부합하도록 시공을 관리하는 방법이다. 효과적으로 높은 최종 주입압을 달성하기 위해서는 주입압의 절대치보다는 시간적 변화폭이 시공관리상 유력한 판단 자료가 된다. 이를 위해 자기기록 압력 유량계는 주입시에 있어 지반내의 주입재 거동을 탐지하기 위한 유용한 방법이다. 이 기록계에서는 주입압력과 주입량이 시간 경과에 따라 기록지에 연속적으로 기록되며, 이 데이터는 그대로 T-P-Q 관리도로 사용된다. 그림 3.1은 시멘트 주입시 T-P-Q 곡선을 이용한 관리의 예를 나타내고 있다.

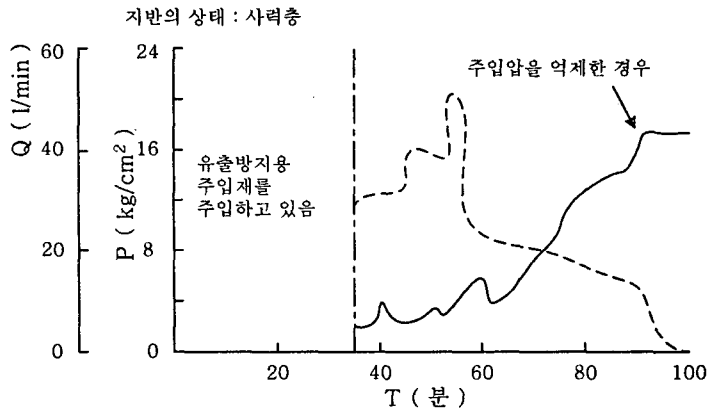


그림 3.1 시멘트 주입곡선 (T-P-Q)

여기서 시간(T)의 경과에 따라 주입압(P)은 분명히 상승하고 주입압을 어떤 크기로 억제하면 주입량(Q)은 감소된다. 또한 주입량(Q)을 일정하게 하면 주입압(P)이 상승한다. 이런 형태의 T-P-Q 곡선이 얻어지면 일반적으로 유효한 주입이 이루어지고 있다고 판단된다. 단, 급결성 화학약액을 복합주입하는 경우는 여러 가지 조건이 다르므로 이와같이 분명한 반응곡선이 나타나지 않는 경우도 많다.

다음은 자기기록계를 이용한 시공관리시 조건별 주입형태를 설명한 것이다.

(1) ㉞형

주입 시작 후 적당한 시간에 P가 반응을 보여 상승경향을 나타내는 경우 사질토에서의 가장 이상적인 침투주입을 나타낸다.

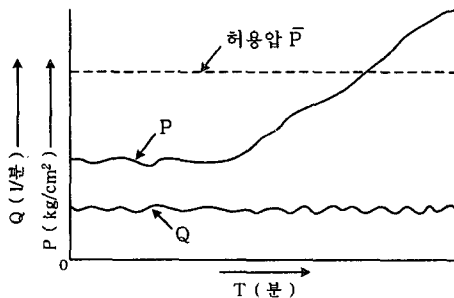


그림 3.2 T-P-Q곡선

(2) ㉟형

주입 압력이 서서히 상승하지만 그 구배가 비교적 완만하여 쉽게 목표 주입 압력에 도달하지 못하는 경우를 나타낸다.

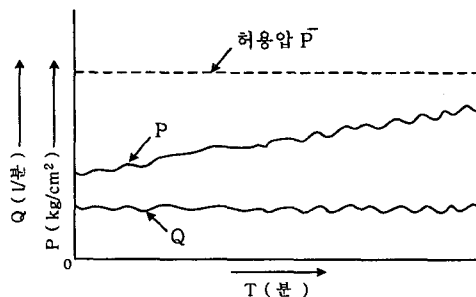


그림 3.3 T-P-Q곡선

- 점성토의 맥상주입에서 나타나며 점차 주입효과가 상승하고 있다.

- 사질토에서 침투주입을 목표로 했지만 토질이 예상보다 느슨하여 일부 맥상주입이 나타나고 있다.
- 침투주입이 이루어지고 있으나 주입재의 농도가 낮고, 겔타임이 너무 길다.
- 약액의 일부가 대상지층 외부로 유출되고 있다.

**(3) ㉠형**

압력이 전혀 상승하지 않던가 오히려 하강하는 경우로 실제 이런 상황을 가끔 볼 수 있다.

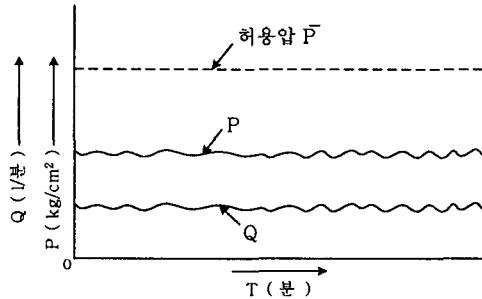


그림 3.4 T-P-Q곡선

- 점성토에 맥상주입으로 주입재가 광범위하게 유출되고 있다.
- 주입재가 지표로 유출되고 거나 공동으로 유출되고 있다.
- 지표 근처의 공극이 많은 층으로 유출되고 있거나, 지하매설물 내로 유출되고 있다.
- 주입재가 2종류이상인 경우 미혼합 등으로 겔화 되지 않았다.

**(4) ㉡형**

상승하던 주입 압력이 어떤 시점에서 돌연 강하하고, 그후 회복되지 않는 경우를 나타낸다.

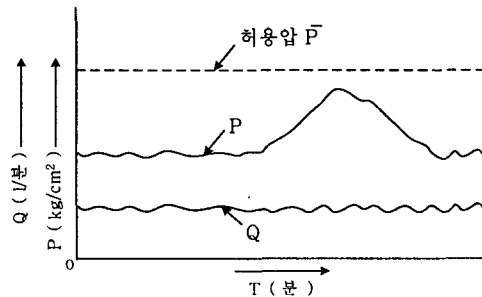


그림 3.5 T-P-Q곡선

- 주입관 주변의 패커가 파괴되고, 주입재가 유출하기 시작했다.
- 주입속도가 너무 빨라, 지반을 교란하면서 유출되기 시작한다.
- 주입재가 어느 순간에 공동이나 약한 부분을 만나 맥상 주입으로 바뀌어 버렸다.

**(5) ㉢형**

D형의 상승하강 패턴을 반복하면서 점차적으로 주입압력이 상승해 가는 형태. 주입시간에 비해서 겔타임이 짧은 약액 주입인 경우에서 자주 볼 수 있다.

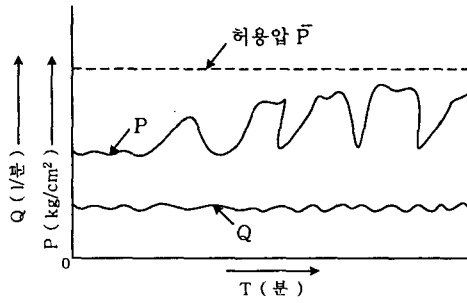


그림 3.6 T-P-Q곡선

- 먼저 주입되어 겔화한 주입재가 후에 주입되는 주입재에 의해 순차적으로 할렬파괴되면서 침투 되가는 과정을 나타낸다고 볼 수 있다.
- 이러한 유형의 곡선에서는 적절한 주입이 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

### (6) ㉞형

주입 개시 직후에 주입압이 급상승하여 허용 압력을 넘어 버리는 경우를 나타낸다.

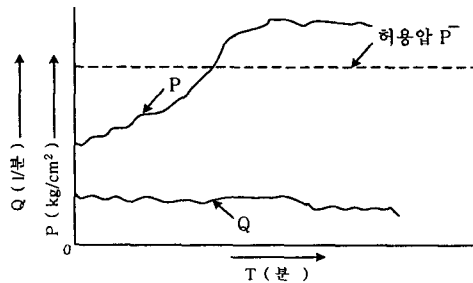


그림 3.7 T-P-Q곡선

- 토층이 조밀해서 주입할 수 없다.
- 겔 타임이 너무 짧다.
- 주입관이 막히고 있다.

## 3.3 주입속도와 한계주입압 관리법

### (1) 주입속도

토사지반에 대한 그라우팅시 주입속도는 가능한 한 느리게 하는 것이 좋다. 침투주입의 대상이 되는 사질토층이 투수계수는  $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ 의 범위이고, 암반의 균열에 주입하는 경우와 달라서 급속히 약액을 받아들일 수 없으며, 무리하게 큰 주입속도로 주입을 계속하면 간극수압이 상승하고, 그 결과 지반의 연약한 부분이 파괴되어 그곳을 중심으로 맥상주입으로 변화하게 된다.

한편, 주입재의 점성과 겔타임등을 고려할 때 주입속도를 무한정 느리게 할 수는 없다. 따라서 시공 현장에서는 겔타임을 보통 1~5분 정도로 하고 있지만, 점성토에 대한 주입시는 사질토일 경우보다 상당히 짧게 하고 있다. 이는 점성토에서는 맥상주입이 되므로 점성토의 층리면이나 기타 약한 부분을 따라 강제로 전단을 일으키고, 그 단면에 박판상으로 침입하게 되므로 약액이 유입하는 유입단면이 사질토에 비해 대단히 작게 된다. 또한 주입재의 침투속도에 관한 식  $V=q/A$ 에서 A가 아주 작으므로 겔타임을 짧게하지 않으면 주입재는 빠른 속도로 주입범위 외로 벗어나게 된다. 특히 부식토층의 경우는 이 경향이 더욱 크다. 그러므로 점성토에서는 겔타임은 짧게, 또 1회에 계속해서 주입하는 양은 될 수 있는 한 소량으로 하여 여러 회로 나누어 반복 주입하는 것이 이상적이다.

## (2) 임계 압력과 주입압의 한계

압력분사 그라우팅이 이루어지는 주변지반의 거동은 공내재하시험과 유사하며, 이를 구체적으로 나타내면 그림 3.8과 같다(Haberfield and Johnston,1990). 그라우팅 압력이 작은 상태에서 지반은 탄성적인 거동을 하며, 그라우팅 압력이 임계압력( $P_{cr}$ )보다 커지면 지반에 수압파쇄(hydraulic fracturing)현상이 발생한다. 이 때의 지반은 탄, 소성 거동을 하며 분사압력이 한계압력( $P_{lim}$ )보다 커지게 되면 지반은 소성 거동을 나타낸다. 수압파쇄 현상은 주변지반의 소성화로 그라우트체의 팽창이 가속되지만 지반 지지력의 증가는 발생하지 않기 때문에, 분사압력은 수압파쇄 현상이 발생하지 않도록 조절하여야 한다. 이러한 수압파쇄 현상을 방지하기 위한 방법으로 그라우트의 주입압력을 그림 3.9(c)와 같이 단계별로 증가시켜 시공할 경우에는 주변지반이 보강되면서 주입압력이 서서히 증가하기 때문에 수압파쇄 현상을 방지하면서 주변지반의 보강효과 및 지지력의 증가효과가 우수하게 나타난 연구사례도 있다(Kleyner et al., 1993).

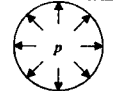
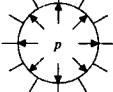
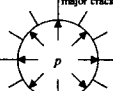
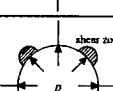
구분	개요도	주입압	지반거동
I		$p < p_{cr}$	· 탄성거동
II		$p = p_{cr}$	· 지반 내 균열 발생 · 수압파쇄 발생
III		$p_{cr} < p < p_{lim}$	· 탄,소성 거동 · 지반 내 균열 발달
IV		$p > p_{lim}$	· 소성거동

그림 3.8 그라우팅 주입압에 따른 지반거동 (Haberfield and Johnston, 1990)

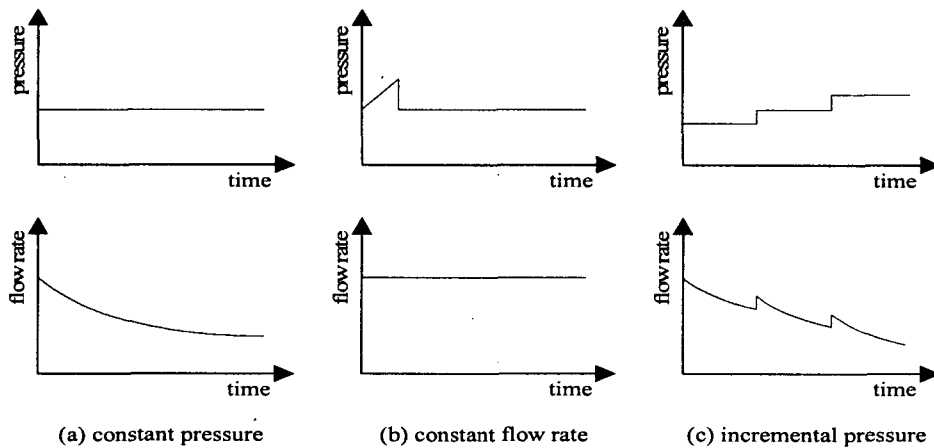


그림 3.9 그라우트 주입 방식 (Kleyner et al., 1993)

## 4. 경험적 주입압

주입압은 앞에서 언급한 바와 같이 지반조건, 환경조건 시공목적 등에 따라 달라질 수 있으며 빈번하게 주입의 대상이 되는 사질토 지반에서의 경험적 수치는 일반적으로  $2\sim 5\text{kg/cm}^2$  정도이고, 다른 요인이 작용하는 경우  $10\text{kg/cm}^2$  이상 되는 경우도 있다. 특히, 붕괴된 느슨한 사질토 지반이나 풍화암 파쇄대

지반에는  $3.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 주입압이 가장 효과적이라는 연구결과도 있다(명지대학교 지반공학연구실, 2002). 또한, 주입압에 의해 주변 구조물이 나쁜 영향을 받는 경우가 있으므로 기존 구조물의 인접지반에 주입을 할 때는 상대적으로 겔타임을 길게하고 작은 압력으로 서서히 주입하는 것이 효과적이다. 따라서 합리적인 사면보강 공사를 위해서는 보강재와 지반을 일체화 시킬 수 있는 압력 그라우팅 주입방식이 더 효과적인 주입방법이라 판단된다.

## 5. 결론

현재 국내에서 주로 적용되고 있는 사면보강용 억지공법에 대한 시공시 또는 장기적 안정성에 영향을 미칠 수 있는 주요공정 및 시공관리 사항을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 억지공법에는 대부분 천공 및 그라우팅 공정이 공통적으로 포함되며 보강공사의 품질을 좌우하는 가장 중요한 공정의 하나는 그라우팅으로 판단된다. 그라우팅 공정의 시공품질이 불량한 경우 보강재의 부식 및 인발력의 부족으로 대규모 사면붕괴를 유발시킬 수 있는 잠재적인 불안정성은 항상 존재하게 된다.
- (2) 절리 및 파쇄대가 발달한 대부분 지역에서 Rock Bolt 공법 및 Soil nailing 공법의 시공시 흘채움방식의 그라우팅을 지반조건에 부합되는 압력 그라우팅 공정으로 개선하면 기존의 문제점을 해결할 수 있으며, 동시에 보강재 사이의 주면 마찰력을 증가시켜 보강효과를 극대화 할 수 있을 것이다.
- (3) 그라우트재 주입관리 방법은 정압주입법, 정량주입법 및 자기기록계 이용법 등이 있으나, 지반조건에 알맞은 합리적인 주입 시공관리를 위해서는 자기기록계를 이용하여 관리 하는 것이 가장 타당한 것으로 판단된다.
- (4) 억지말뚝 시공시 천공후 강관을 삽입하는 방식의 가장 큰 문제점은 천공홀의 붕괴, 지하수 침투, 보강재의 부식 및 원지반의 이완 등이며 이를 방지하기 위해서는 천공과 동시에 강재를 삽입하는 방안 (PRD 공법 등)이 반드시 포함되어야 한다.
- (5) 사면보강공사가 효과적이고 합리적으로 수행되기 위해서는 충분한 지반조사 및 시공성 있는 설계가 반드시 필요하며, 또한 정량적인 시공관리방안이 수립되어야 사면의 장기적인 안정성도 확보될 수 있으리라 판단된다.

## 참고문헌

1. 김홍택(2001), “쏘일네일링의 원리 및 지침”, 평문각
2. 대우 건설기술연구소(1988), “지반 개량을 위한 그라우팅 공법에 관한 연구”.
3. 명지대학교 지반공학연구실(2002), “가압그라우팅에 의한 지반보강효과 연구”
4. 서울대학교 공학연구소, 한국도로공사 도로연구소(2002), “FRP보강 그라우팅 공법의 설계법 연구”
5. 천병식(1998), “최신 지반주입 이론과 실제”, 원기술.
6. 한국지반공학회(2002), “사면안정기술의 최근 연구동향”, 한국지반공학회지 Vol. 18, No. 4
7. Kleyner, I. M., krizek, R. J. and Pepper, S. F. (1993), Influence of Grout Pressure on Capacity of Bore-Injected Piles and Anchors, Proceedings of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria