

사면 보강효과 확인을 위한 원심모형실험

Centrifuge Model Tests for the Slope Reinforcement Effect

박용원¹⁾, Yong-Won Park, 김병일²⁾, Byoung-Il Kim, 박종호³⁾, Jong-Ho Park, 홍성수⁴⁾, Sung-Soo Hong

¹⁾ 명지대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

²⁾ 명지대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

³⁾ 명지대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

⁴⁾ 명지대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

SYNOPSIS : This paper presents the results of centrifuge model tests on the reinforced slope by pressure grouting. Tests were performed to investigate the reinforcing effect of grouting. In the tests, slopes of scale factor 1/10 were used changing the space and number of reinforcing bar. Test results are as the follows;

1. The reinforcing effect increase rapidly with reinforcement area ratio at low value of reinforcement area ratio.
2. At high reinforcement area ratio the increase ratio of reinforcing effect decrease.
3. At same reinforcement area ratio, the reinforcing effect of double reinforcing bar was larger than the single reinforcing bar due to arching effect.

Key words : Centrifuge Model Tests, Pressure Grouting, Reinforce Area Ratio, Slope Reinforcement

1. 서론

산업화에 따른 급속한 경제발전과 더불어 교통량이 증가함에 따라 도로를 신설하거나 선형을 개량하면서, 터널을 굴진하거나 자연지반을 절취하여 대규모 사면을 조성하는 경우가 빈번하고 있다. 자연지반을 굴착하여 터널이나 사면을 조성하는 경우 굴착 규모가 작을 때에는 안정성에 대한 영향이 작지만, 절취되는 대상지역이 넓거나 터널 규모가 큰 경우에는 불연속면의 연장이 길어지고 취약부분의 노출도 상대적으로 많아지면서 터널 및 사면의 안정에 커다란 영향을 준다. 이러한 경우 취약지반을 보강함으로써 안정성을 확보할 수 있으며 과거에 주로 사용된 사면보강공법으로는 쏘일 네일링 및 록볼트 공법과 앵커공법이 있고, 터널의 천단부 붕락을 방지할 목적으로 적용되는 포폴링과 프리그라우팅 공법 등이 있다.

최근 국내 토목공사 현장에서 자주 적용되고 있는 가압 그라우팅 방식의 지반보강공법은 지중에 그라우트재를 압력 주입함으로써 천공홀을 확장시킬 뿐 아니라 주변지반의 공극 및 불연속면 등에도 주입재를 침투시켜 굴착사면의 붕괴를 방지하고 장기적 안정성을 확보한다. 특히, 균열 및 절리가 매우 심한 파쇄 암반이나 점착력이 거의 없어서 굴착시 이완된 느슨한 사질토 지반의 강도증진 및 차수 목적으로도 자주 적용되고 있다. 그러나, 현재 시공되고 있는 가압 그라우팅 공법은 여러 가지 장점에도 불구하고

고 지반조건에 부합되는 설계압력 및 주입량 등에 관한 기준이나 그라우팅 효과에 대한 연구가 아직까
 지 미흡한 실정이다.

따라서, 이 연구에서는 가압 그라우팅에 의해 보강된 사면의 강도증진 효과를 정량적으로 확인하기
 위해 풍화토를 이용한 모형사면을 조성한 후 원심력 파괴모형시험을 실시하였다. 원심력 모형시험은
 보강재의 직경을 변화시키면서 5단계로 나누어 실시하였으며, 동일 면적비로 2열 보강된 사면을 조성하
 여 모형시험을 실시하고 보강재 사이의 아칭 효과를 확인하였으며, 보강효과를 검증하였다.

2. 모형지반구성

모형사면 조성용 시료는 경기도 용인지역에 넓게 분포되어 있는 화강 풍화토를 이용하였고, 현장에서
 채취한 토사 중 #4번 체를 통과한 흙으로만 사면 조성에 사용하였으며, 그 물리적 특성은 표 2.1과 같다.

표 2.1 시험에 사용된 재료의 기본물성

흙분류 (USCS)	비중 (G_s)	함수비 (%)	γ_{dmax} (t/m^3)	γ_{dmin} (t/m^3)	초기상대밀도 D_r (%)	전단저항각 ϕ (°)
SM	2.65	14.0	1.75	1.18	50	35.2

3. 시험 방법 및 조건

3.1 소형 원심력 시험 장치

굴착사면의 보강 전, 후에 대한 안정성을 검토하기 위하여 모형사면을 조성한 후 명지대 토목환경공
 학과 지반공학연구실에서 개발한 소형 원심력 시험기를 이용하였다. 원심력 시험기는 팔길이 50cm인
 팔(boom) 8개가 대칭으로 부착되어 있어 동시에 최대 8개의 모형시험이 가능하도록 제작되었으며, 상세
 한 구조는 그림 3.1과 같다.

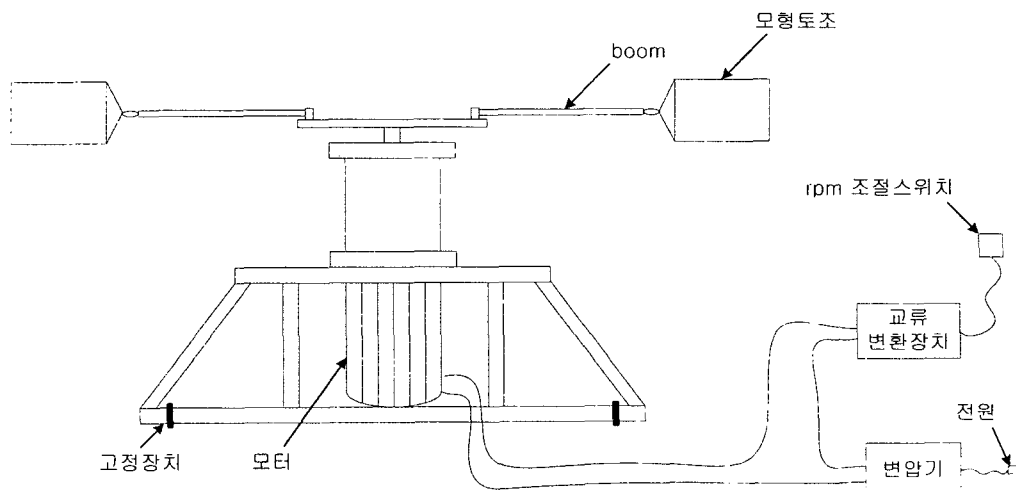


그림 3.1 원심력 시험장치

3.2 시험 방법 및 순서

이 연구에 사용된 원심력 시험용 모형 토조는 철재 앵글 프레임을 이용하여 50cm×25cm ×40cm 크기로 총 4개를 제작하였다. 바닥판과 후면은 합판으로 조립하였고, 전면과 측면에는 투명한 아크릴판을 각각 부착하여 모형지반 거동을 육안으로 관측할 수 있도록 하였다. 원심력 시험기는 1회에 4개의 모형 사면을 조성하여 원심력 파괴시험을 동시에 실시하였으며, 세부적인 시험방법은 다음과 같다.

- ① 모형사면의 침하량 관찰이 용이하도록 가로줄과 사면구배가 표시된 토조에 함수비를 조절해서 미리 준비해 놓은 시료를 넣고, 상대밀도를 측정하면서 다진다. 이때 토조 1개 조성에 필요한 총 시료무게는 38±1kg을 기준으로 하였다(상대밀도 50%).
- ② 모형지반은 총 7층으로 나누어 성토 다짐하였으며, 각 층의 마무리 두께는 4cm로 하고, 각 층의 다짐이 완료된 후 측벽 쪽에는 약 2mm 두께의 염색사(적색)를 띠 형태로 포설하여 시험 중 발생한 사면의 변위를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.
- ③ 각 층별 다짐이 완료되면 토질 시험용 칼날을 이용하여 전면판을 깎아내어 필요한 사면구배(1:0.5)로 조성하고 상재하중용 철구(직경 3mm)를 재하시킨 후 사면 연단에서 3cm 떨어진 지점 중앙부에 다이얼게이지를 부착하여 보강 전 모형사면조성을 완료한다.
- ④ 가압 그라우팅에 의해 보강된 지반의 구근 형성비를 고려하여 미리 제작해 놓은 철심 박은 콘크리트 원주를 무보강 사면 내부에 15° 하향으로 천공하고 삽입한다. 또한, 1개의 보강체와 동일한 면적비인 2개 보강체에 대한 아칭효과를 확인하기 위하여 각각의 토조에 모형사면을 조성한다(모형시험 조건 참조).
- ⑤ 모형사면 조성이 완료된 토조의 양단을 원심력 시험기 팔(boom) 2개에 각각 고정하여 1회에 총 4개의 토조를 설치하고 rpm을 점차 증가시키면서 원심력 모형시험을 실시한다.

3.3 시험 조건

모형사면 조성이 완료된 토조에 대하여 rpm을 높여 중력가속도(g)를 2g씩 상승시키면서 원심력 파괴 시험을 실시하였으며, 모형지반에 실제의 1/10로 축소하여 만든 보강체의 직경과 면적비로 환산한 원지반의 보강간격은 표 3.1과 같다. 또 같은 사면 내에 2개 이상의 보강체가 시공될 경우 발생하는 지반의 아칭효과를 확인하기 위하여 동일한 면적비로 환산하여 2개의 보강체 직경을 산정하여 모형시험을 실시하였고, 그 직경도 표 3.1에 나타내었다.

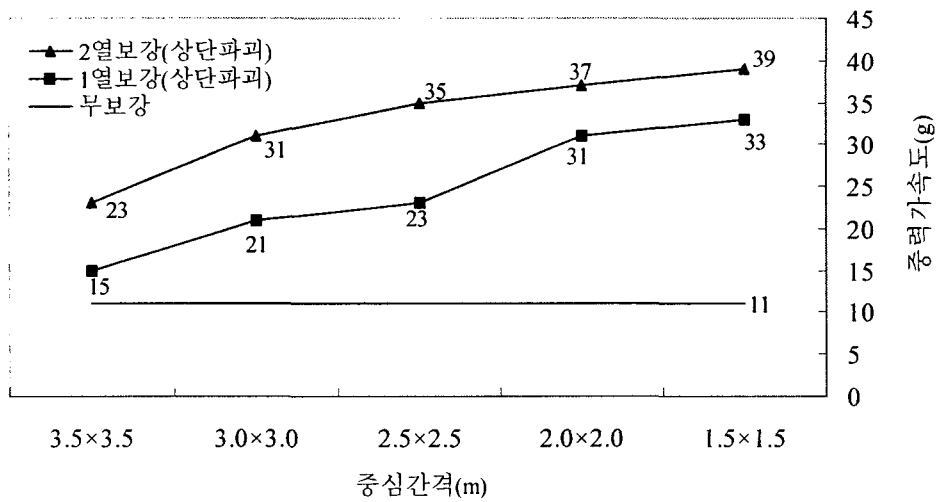
표 3.1 면적비로 환산한 보강재 직경

현장 보강간격 및 직경 (mm)	1.5m×1.5m	2.0m×2.0m	2.5m×2.5m	3.0m×3.0m	3.5m×3.5m
모형지반 보강재	φ 370	φ 280	φ 220	φ 180	φ 160
1열	φ 37	φ 28	φ 22	φ 18	φ 16
2열	φ 26	φ 19.5	φ 16	φ 13	φ 11

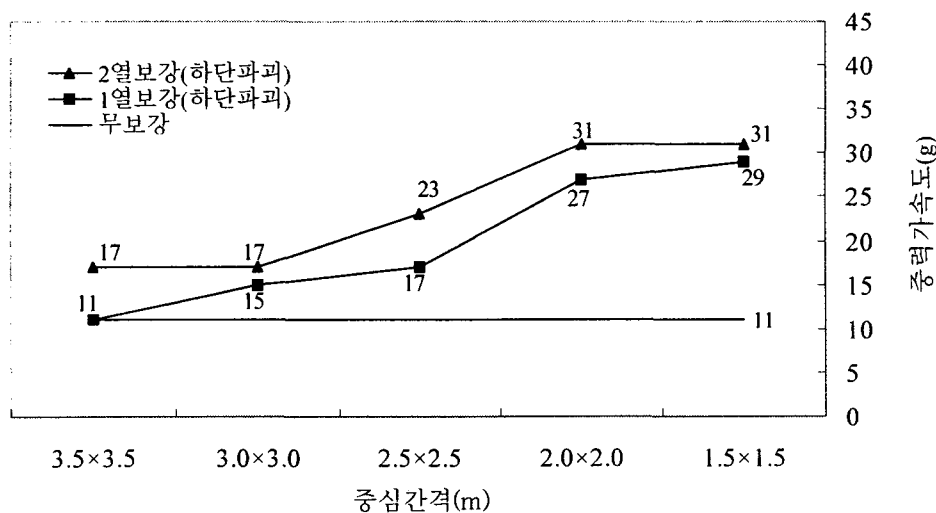
4. 시험 결과 및 분석

그림 4.1은 각 보강간격별 원심모형시험 결과를 나타낸 것이다. 그림 4.1의 (a)는 보강재의 상단부, 즉 사면 상단까지 파괴가 발생했을 때의 중력가속도를 나타낸 것으로 보강간격이 1.5×1.5m로서 보강재의 지름이 가장 큰 사면이 가장 큰 중력가속도 33g(1열 보강 시)와 39g(2열 보강 시)에서 파괴가 발생하였고, 보강재의 지름이 가장 작은 3.5×3.5m 간격으로 보강된 사면이 가장 낮은 중력가속도 15g(1열 보강 시)와 23g(2열 보강 시)에서 파괴되었다. 그림 4.1 (a)에서 사면을 1열로 보강한 경우보다는 동일 면적비 2열로 보강하였을 때 사면의 강도가 더 큰 것을 알 수가 있으며, 강도 증가비 또한 2열 보강시에 더 일정하게 증가하는 것을 알 수가 있다.

그림 4.1의 (b)는 보강재의 하단부에서 크랙이나 사면 붕괴가 일어났을 때의 중력가속도를 나타낸 것으로 상단부 파괴시보다는 더 낮은 중력가속도(g)에서 파괴가 발생하였지만 상단부 파괴와 비슷한 양상을 보였다.



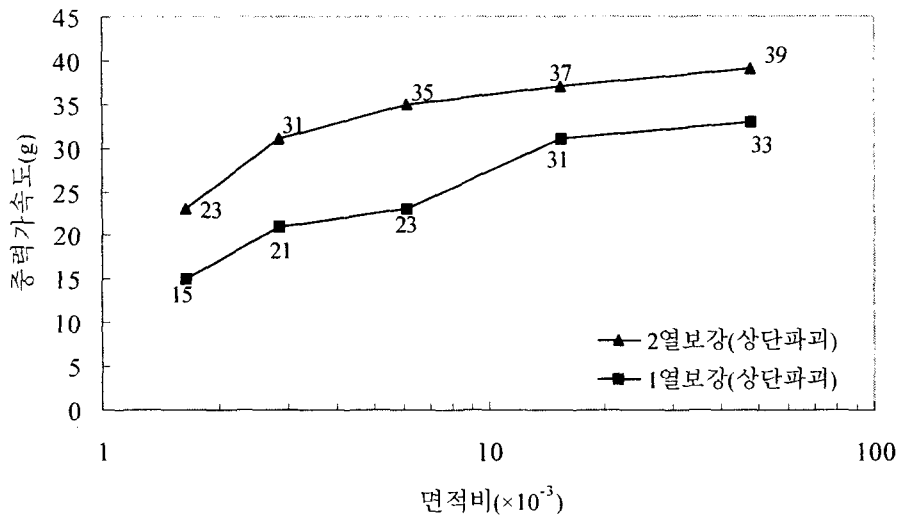
(a) 각 CASE별 사면 상단파괴



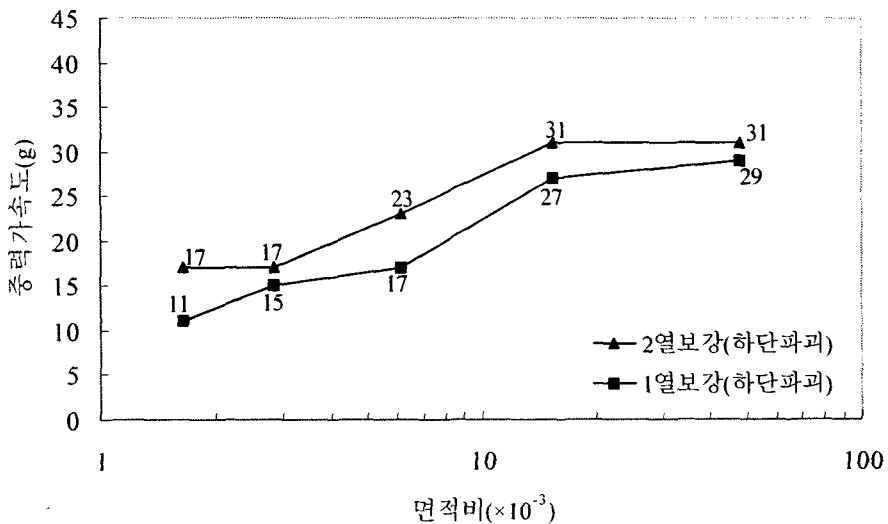
(b) 각 CASE별 사면 하단 파괴

그림 4.1 사면 파괴시 중력가속도

그림 4.2는 원심 모형시험 결과를 보강간격 면적비($a_s=A_g/A$)에 대해 비교한 것이다. 즉, 1.5×1.5m는 47.8×10^{-3} 로, 2.0×2.0m는 15.4×10^{-3} 로, 2.5×2.5m는 6.08×10^{-3} 로, 3.0×3.0m는 2.83×10^{-3} 로, 3.5×3.5m는 1.64×10^{-3} 로 각각 면적비로 환산 계산해서 중력가속도와와의 관계를 대수 좌표로 나타낸 것이다. 그 결과 면적비 2.83×10^{-3} 에서 15.4×10^{-3} 까지, 즉 보강간격 2.0×2.0m에서 3.0×3.0m까지는 사면의 강도가 거의 선형적으로 증가하였다. 다시 말해 보강재 간격이 3.0m 이상이 되면 무 보강 사면에 비해 그리 큰 강도 증가가 보이지 않았고, 보강간격이 가장 좁은 1.5m의 경우 2.0m에 비해 5% 정도 낮은 강도 증가가 나타났다.



(a) 각 CASE별 사면 상단파괴



(b) 각 CASE별 사면 하단 파괴

그림 4.2 사면 파괴시 면적비와 중력가속도(g)

위의 결과에서 각 보강 간격별 파괴시 중력가속도를 이용해 한계 평형상태에서의 안전율을 구하는 식

으로부터 무 보강시의 사면 점착력을 구하고 그 결과로부터 보강 사면의 점착력을 산출해 표 4.1에 나타내었다. 그림 4.3은 보강된 사면에서 사면 상단 파괴시 계산된 점착력과 면적비의 관계를 나타낸 것으로 그림 4.2 (a)와 같은 양상을 나타내고 있다.

$$F_s = \frac{cA + W_f \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi}{W_f \sin \theta} \quad (4.1)$$

여기서, F_s : 안전율(1.0),

A : 파괴 단면적 (cm^2)

W_f : 파괴토체 무게 + 상재하중(kg),

θ : 파괴면과 수평면사이 각

표 4.1 보강 간격별 파괴시 점착력 증가량

CASE NO.	보강간격 (m)	보강 면적비	환산직경 (mm)		파괴시 중력가속도(g)	점착력 (t/m^2)
			2열보강	ϕ		
1	1.5×1.5	47.8×10^{-3}	2열보강	ϕ 26	39	7.978
2			1열보강	ϕ 37	33	6.751
3	2.0×2.0	15.4×10^{-3}	2열보강	ϕ 19.5	37	7.569
4			1열보강	ϕ 28	31	6.342
5	2.5×2.5	6.08×10^{-3}	2열보강	ϕ 16	35	7.160
6			1열보강	ϕ 22	23	4.705
7	3.0×3.0	2.83×10^{-3}	2열보강	ϕ 13	31	6.342
8			1열보강	ϕ 18	21	4.296
9	3.5×3.5	1.64×10^{-3}	2열보강	ϕ 11	23	4.705
10			1열보강	ϕ 16	15	3.069
11	무 보강		-		11	2.250

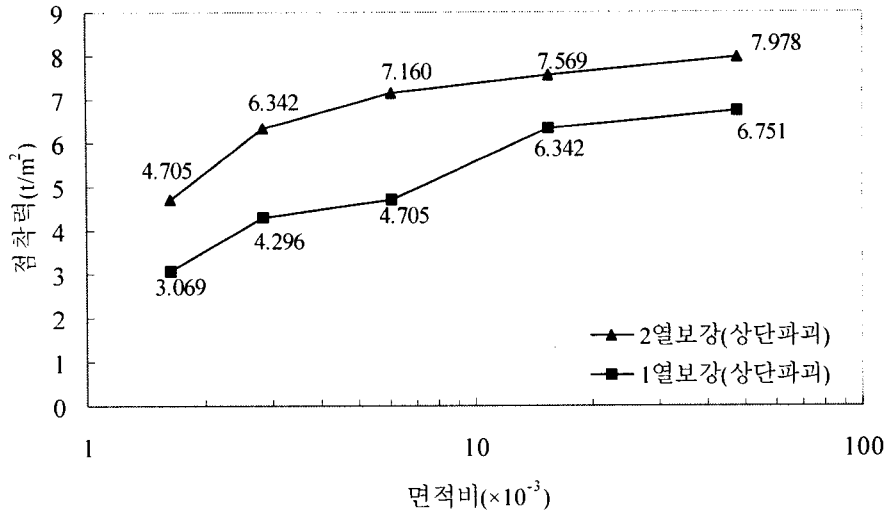


그림 4.3 사면 상단부 파괴시 면적비와 점착력

5. 결론

이 연구에서는 보강재의 직경을 변화시키면서 5단계로 나누어 원심모형시험을 실시하였다. 또, 동일 면적비로 2열 보강된 사면을 조성하여 보강재 사이의 아칭 효과를 확인하였고, 보강효과도 검증하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 보강 면적비가 가장 작은 $3.5m \times 3.5m (1.64 \times 10^{-3})$ 의 경우 2열 보강시 무보강사면에 비해 약 2.1배 ($2.46t/m^2$ 증가)의 점착강도 증가가 나타났고, 보강 면적비가 가장 큰 $1.5m \times 1.5m (47.8 \times 10^{-3})$ 의 경우 2열 보강시 무보강사면에 비해 약 3.5배 ($5.73t/m^2$ 증가)의 점착강도가 증가한 것으로 나타났다.
2. 보강간격에 관계없이 사면을 1열로 보강했을 때보다는 동일 단면적으로 2열로 보강할 때 점착강도가 19%에서 최대 52%까지 크게 발휘되었다. 이것은 동일 면적비에서 보강재 갯수가 증가함에 따라 아칭효과가 크게 발휘되기 때문으로 판단된다.
3. 보강 면적비가 1.64×10^{-3} 에서 6.08×10^{-3} 까지는 점착강도가 거의 선형적인 증가를 보였지만, 그 이상의 면적비에서는 증가율이 감소하는 것으로 나타났다.
4. 시험결과 함수비 약 14%이고, 상대밀도가 50% 정도인 보통 내지는 느슨한 풍화 잔류토 사면에서 가압 그라우팅으로 보강하는 경우에는 2.0m~3.0m의 간격으로 보강하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 유남재, 김영길, 박병수, 홍영길(2001), "하중재하시 소일네일링 구조물의 거동 및 파괴메카니즘에 관한 원시모형실험", 한국지반공학회논문집 제17권 5호 pp. 5~16.
2. RPUM공법 연구회(2001), RPUM 공법소개 및 적산자료.

3. 이덕준(1988), *지반개량을 위한 그라우팅 공법에 관한 연구*. (주)대우 건설기술연구소.
4. 진병익, 천병식(1982), “연약지반 처리공법”, *건설연구사*, pp. 182~220.
5. 박기정, 이처근, 안광국, 허열(2000), “화강토 지반상 개착식 터널의 거동에 관한 원심모형실험”, *대한토목학회논문집*, 제20권 제6-C호, 2000년 11월, pp. 579~590.
6. 사단법인 한국지반공학회(1994), *지반공학 시리즈 5 사면안정*, pp. 269~318.
7. Igor Kleyner, Raymond J. Krizek(1995), “Mathematical Model For Bore-Injected Cement Grout Installations”, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.121, No.11, pp. 782~788.
8. 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*, pp. 159~165.