

실험값을 이용한 NATM터널의 보강효과에 관한 수치해석적 연구

A Numerical Study on the NATM Tunnel Reinforcement using Centrifuge Model Experimental value

허 경 한* / 김 낙 석**
Huh, Kyung Han / Kim, nak seek

Abstract

In this study, in the first place, parameters primarily influenceing displacement and stress were constructed by using the Finite Difference Method; then using those parameters, the result of crown displacement and convergence among the existing, experimental values of a centrifuge model were compared with the result of numerical analysis; and then considering the stress and time effect of lining installation, parameters according to the difference of stiffness were studied.

In the result of this study, it found out that rough, ground reinforcement effect manifests itself when reinforcement propret of the grouting of the big scale steel pipe through 3-D analysis is $E=4,000\text{tf/m}^2$ which of the stiffness of the original ground.

Key words : Finite Difference Method, Centrifuge Model Experiment, Crown Displacement, Convergence, Parameter

요 지

본 연구는 유한차분법을 이용하여 변위 및 응력에 1차적인 영향을 주는 매개변수를 구축하였으며 이를 이용하여 기존원심모형실험값 중 천단변위, 내공변위 결과를 수치해석상결과와 비교하였고, 모형실험에서 다양하게 구현할 수 없었던 응력, 라이닝 설치의 시간적 효과를 고려하여 강성의 차이에 따른 매개변수연구를 수행하였다.

연구결과 3차원 해석을 통한 대구경강관 그라우팅의 보강물성치는 원지반 강성의 8배인 $E=4,000\text{tf/m}^2$ 일 때 개략적인 지반보강효과가 발현되는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 유한차분법, 원심모형실험, 천단변위, 내공변위, 매개변수

1. 서 론

도심지 터널은 비교적 상부지층의 두께가 얇은 천층 터널인 경우가 많으며, 시공시 터널의 안정성 측면에서 다양한 보조공법들이 적용되고 있다. 특히 터널 천단부는 안정성 및 경제성 확보를 위해 그라우팅으로 보강된 영역에 대한 적절한 보강물성치 제안이 필요한 실정이다.

한편 도심지 터널의 천단부 보강물성치에 관한 연구는 주로 균말뚝 형태로 이루어진 실험 및 수치해석으로 합성물성치를 산정하는 방법으로 이루어져 왔다. Ou(1996)는 연약한 원지반과 조립토 말뚝에 의한 개량 토체가 동시에 존재하는 경우를 합성토체로 가정한 다음 치환율의 개념으로 합성물성치를 제안하였다. 또한, N. Loganathan과 H. G. Poulos(2002)는 원심모형실험을 통해 말뚝에 인접하여 터널공사시 지반손실에 따른 지표침하량을 구한 바가 있다.

* 정희원 · 초당대학교 건설정보학과 겸임교수(huh0392@hanmail.net)

** 정희원 · 경기대학교 토목환경공학부 부교수

본 연구는 유한차분법을 이용하여 변위 및 응력에 1차적인 영향을 주는 매개변수를 구축하였으며 이를 이용하여 기존원심모형실험값 중 천단변위, 내공변위 결과를 수치해석상결과와 비교하였고, 모형실험에서 다양하게 구현할 수 없었던 응력, 라이닝 설치의 시간적 효과를 고려하여 강성의 차이에 따른 매개변수연구를 수행하였으며, 교대말뚝에 인접하여 터널상부에 대구경 강관 그라우팅시공시 설계조건을 만족하는 타당한 보강물성치를 산정하고자 하였다.

2. 해석조건 및 방법

2.1 기존 원심모형 실험사례

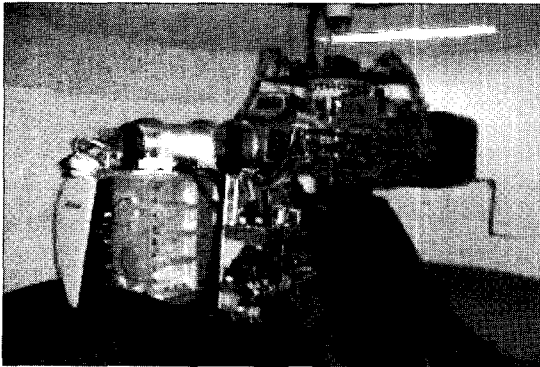


그림 1. 원심모형실험기

자연현상표현의 수단으로서는 힘, 시간, 속도 등의 개념을 이용하여 물리적, 공학적 현상을 표현하고 응력, 변형률 그리고 온도, 농도, 밀도, 더 나아가 이들의 시간적 공간적 거동을 수치 모형을 통해 표현하고 있으며 모형실험의 목적 또한 이에 있다고 할 수 있다.

지반공학에서는 소형화 및 단순화의 필요성이 있음에도 실제거동을 그대로 재현하는데는 많은 어려움이 따른다. 매개가 자중과 관련된 문제들이 많고 자중에 의한 구속압이 지반거동을 지배하기 때문이다. 이러한 한계를 극복하기 위한 노력은 다양하게 시도되어왔다. 예를 들면, 1930년대 러시아의 G.I.Pokrovsk와 미국의 P.B.Bucky에 의해 개념이 수립이 되었고 현재는 지반 내의 응력분포측정, 간극수압의 측정, 말뚝, 옹벽, 얕은 기초, 성토, 굴삭, 터널 등 다양한 문제로의 시도가 끊임없이 이루어지고 나아가 지진시의 지반의 액상화문제, 사면의 안정, 말뚝의 안정 문제 등 동적 문제까지의 모델링 및 이를 이용한 해석방법 개발이라는 복잡한 그리고 새로운 영역의 확대로 응용되고 있다.

2.2 실험/이론식에 의한 지반 손실을 및 지표침하

그림2는 말뚝에 인접한 터널시공시 지반거동에 대한

개념을 나타내었으며, N. Loganathan과 H. G. Poulos는 그림 2와 같은 모델의 원심모형실험을 통해 말뚝에 인접한 터널공사시 지반손실에 따른 지표침하량 및 변위를 구하였으며, 이를 통해 침하량을 예측할 수 있는 Closed Form Solution을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 기존 원심모형실험을 통해 나온 단계별 변위값과 수치해석상의 변위 및 응력 등을 비교하여 터널 천단부의 보강물성치를 산정하고자 하였다.

한편 그림3에 제시된 실제적인 원심모형실험값을 토대로 수치해석적으로 보강물성치를 산정하고자 했다. 단, 지하수위와 상부구조물의 조건은 고려하지 않았다.

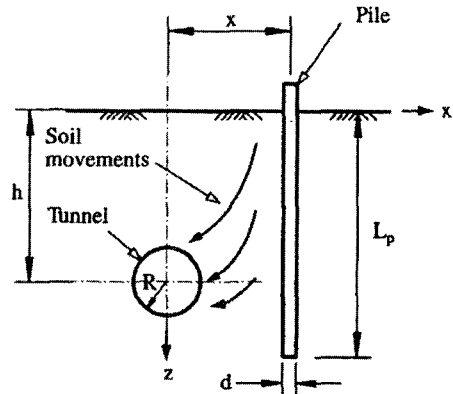


그림 2. 말뚝 인접 터널시공시 지반거동

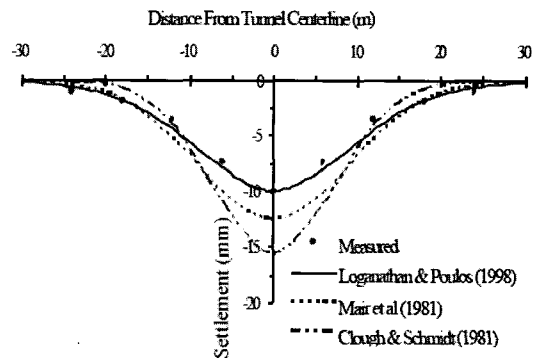


그림 3. 원심모형실험값과 이론값 비교

2.3 보강영역산정을 위한 해석조건 및 방법

본 연구는 교대말뚝에 인접하여 터널상부에 대구경 강관 그라우팅시공시 설계조건을 만족하는 타당한 보강물성치를 구명하기 위하여 총 18개의 3차원 탄소성 모델을 이용하여 보강영역의 탄성계수, 점착력, 내부마찰각을 변화시켜 매개변수 변환연구를 수행하였다

원심모형실험의 상사성에 적합하게 모델링하고 모형토조측벽과 지반의 상호거동을 모사하기위해 Interface 요소를 적용하였으며, 입력값 및 결과값에 대한 중력수준 50G를 고려하였다.

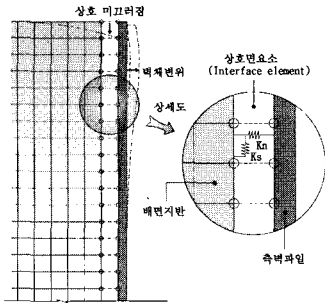


그림 4. 상호면요소 개요

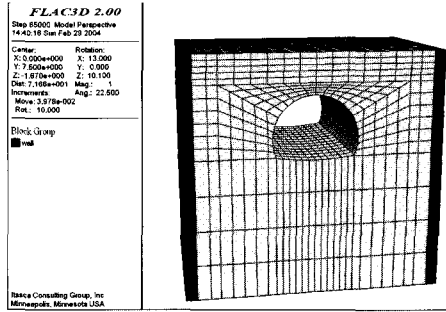
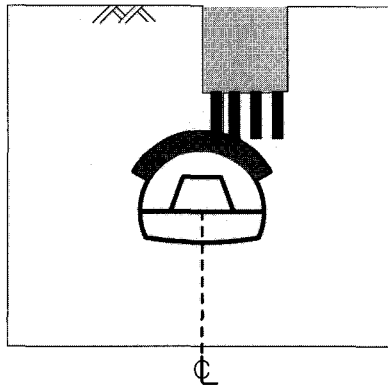
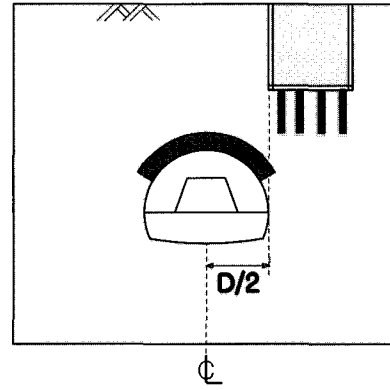


그림 5. 해석 모델링도



Case A



Case B

그림 6. 수치해석 조건도

표 1. OO하부 통과구간 지반특성치

| 구 분 | 단위중량 (tf/m ³) | 점착력 (tf/m ²) | 마찰각 (°) | 변형계수 (tf/m ²) | 포아송비 |
|-----|------------------------------|-----------------------------|------------|------------------------------|------|
| 충적층 | 1.8 | 2.6 | 27 | 500 | 0.40 |

그림 6은 수치해석 조건을 나타내며, Case A는 터널 직상부에 교대말뚝이 있는 경우이고 Case B는 터널중심에서 교대말뚝이 D/2만큼 이격된 경우를 나타낸다.

또한 보강물성치 산정을 위해 그라우팅 영역을 모델링하였다. 표 1에서는 원심모형실험에 사용된 표준사와 유사한 OO하부 통과구간설계에 적용된 지반특성치를 적용하였으며, 지하수 조건, 상부구조물의 거동 등은 고려하지 않았다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 탄성계수별 천단변위 발생경향

그림 7은 교대말뚝이 터널직상부에 위치한 경우이며, 그림 8은 교대 말뚝이 터널스프링라인직상부에 위치한 경우이다. 그림 7은 교대말뚝이 터널직상부에 위치할 때, 각 탄성계수별로 굴진율에 따른 천단변위발생량을 나타낸 것이다. 터널굴착이 진행됨에 따라 변위는 수렴되는 경향을 보이며 탄성계수가 $8 \times E$ (orgion_

modulus=500 tf/m²)일 때, 모형실험에의한 변위분포양상과 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

그림 8은 교대말뚝이 터널스프링라인에 위치할 때, 각 탄성계수별로 굴진율에 따른 천단변위발생량을 나타낸 것이다. 터널굴착이 진행됨에 따라 변위는 수렴되는 경향을 보이며 탄성계수가 $4 \times E$ (orgion_modulus=500 tf/m²)일 때, 모형실험에의한 변위 경향과 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

그림9와 그림10은 교대말뚝이 터널직상부에 위치할 때의 좌,우 내공변위를 나타낸 것이다. 천단변위에 비해 탄성계수에 의한 영향이 미미함과 동시에 보강에 대한 영향이 없음을 나타낸다.

터널 굴진율의 약 70%까지는 실험값과 수치해석상의 값이 유사하며 이후는 실험값이 다소 크게 발생하였다. 이는 모형실험상의 흡입자크기에 따른 축척영향으로 다소 과다하게 나온 것으로 판단된다. 또한 우측 내공변위가 상대적으로 작게 나온 이유는 교대 말뚝의 위치가 터

널중심부에서 우측편에 위치하므로 자중의 일부를 맡뜩이 부담하며, 마찰말뚝개념에 따른 영향으로 판단된다.

3.2 보강영역의 점착력 및 내부마찰각 변화에 따른 보강효과

점착력을 매개변수로 하여 수치해석을 수행한 결과 아무런 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 보강되는 영역이 흙의 파괴거동을 따르는 것이 아니라, 주입된

그라우팅은 물·배합비에 따라 탄성적으로 변하는 콘크리트에 가까운 것으로 판단된다.

그림 11은 내부마찰각별 굴진에 따른 천단변위를 나타낸 것이다. 이때 내부마찰각의 변화는 굴진에 따른 변위값의 변화정도는 매우 적게 나타났다. 그림 12는 수치해석상에서는 하중위치의 변화로 굴착초기에 변위가 억제되는 경향을 나타내나, 모형실험값과는 유사한 변위경향을 보여주고 있다.

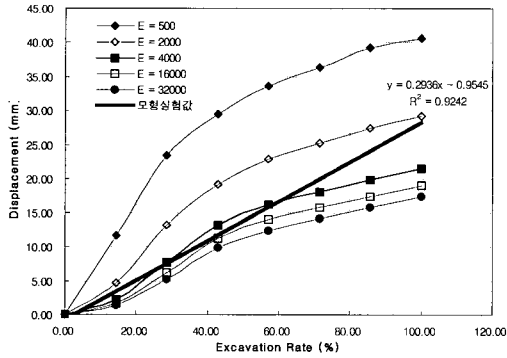


그림 7. 탄성계수별 굴진에 따른 천단변위 발생경향(Case A)

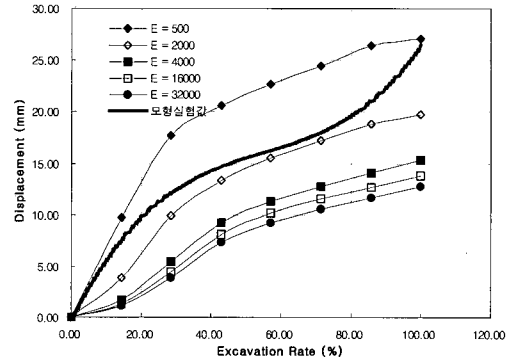


그림 8. 탄성계수별 굴진에 따른 천단변위 발생경향(Case B)

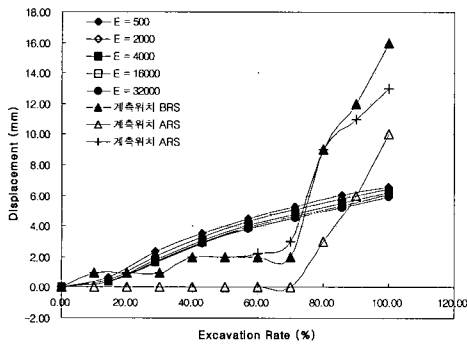


그림 9. 탄성계수별 굴진에 따른 변위 Case A (좌내공)

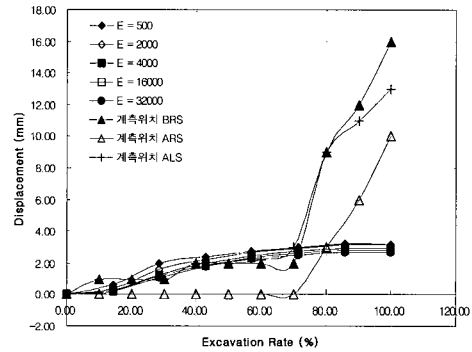


그림 10. 탄성계수별 굴진에 따른 변위 Case A (우내공)

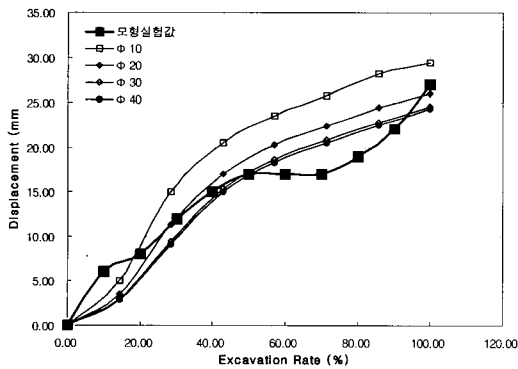


그림 11. 내부마찰각별 굴진에 따른 변위 (Case A)

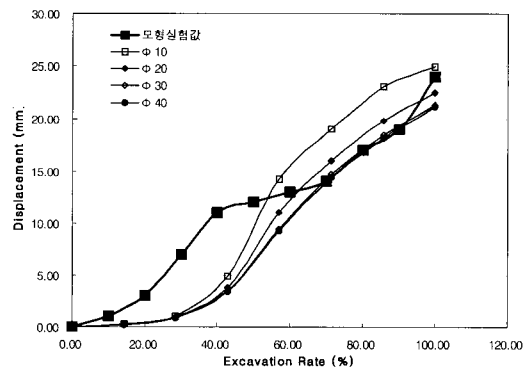


그림 12. 내부마찰각별 굴진에 따른 변위 (Case B)

3.3 굴착단계별 응력값에 따른 천단변위발생경향

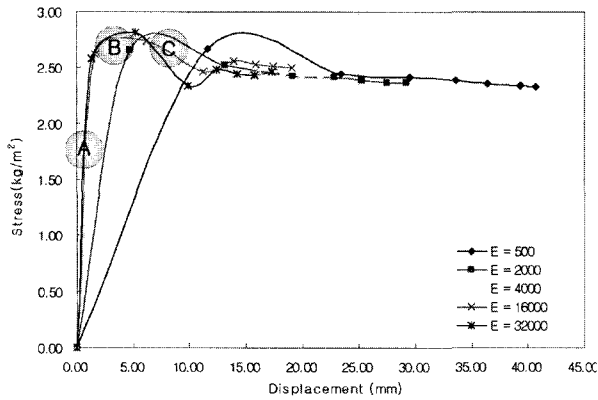


그림 13. 탄성계수별 응력과 변위의 상관관계

그림13의 탄성계수별 응력과 변위의 상관관계에서 A 구간에서는 일정수준의 응력증가에 비해 변위의 영향은 매우 적었으며 이에 해당하는 탄성계수의 범위는 원지반강성의 약 4~8배 사이로 나타남을 알 수 있었다. 또한 B구간에서는 서서히 변위가 증가됨을 알 수

있으며 C구간에서는 초기에 과도한 변위가 발생되며 보강효과 또한 나타나지 않음을 알 수 있었다.

따라서, 변위증가폭이 미미한 A구간에 해당하는 탄성계수 즉, 원지반탄성계수의 약 8배일때에 초기변위에 대해 안전함을 알 수 있었다.

3.4 변위경향에 따른 소성영역

그림14 ~그림17는 변위와 응력과의 상관관계에서 응력의 변곡점을 소성영역으로의 전환부라고 보았을 때 각 탄성계수별로 소성영역으로 발달되는 수준을 알아보았다.

그림 14, 15, 16, 17에서 나타난 바에 의하면 원지반강성의 8배인 $E=4000 \text{ tf/m}^2$ 일 때 개략적인 지반보강효과가 발현되는것을 확인하였다. 이에 탄성계수별 변위에 따른 소성영역을 확인해 본 결과 $E=4000 \text{ tf/m}^2$ 일 때 소성영역으로 전환하는 시점에서의 변위가 다른 탄성계수인 경우에 비해 현저히 줄어들었으며, 탄성계수가 원지반강성의 약 8배일 때 응력 및 변위 모두 안정적으로 수렴하며 보강효과를 발휘하는 것으로 판단된다.

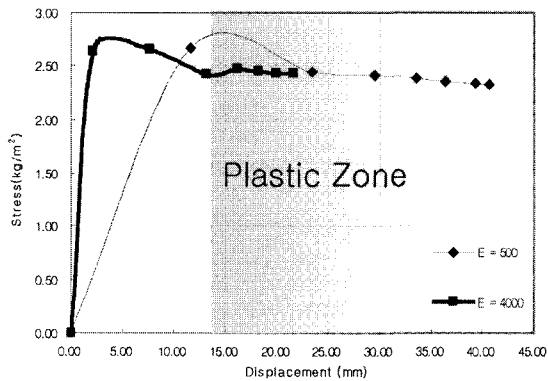


그림 14. 탄성계수별 변위에 따른 소성영역 ($E=500 \text{ t/m}^2$)

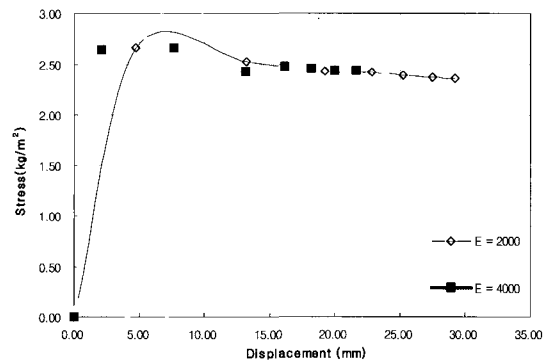


그림 15. 탄성계수별 변위에 따른 소성영역 ($E=2000 \text{ t/m}^2$)

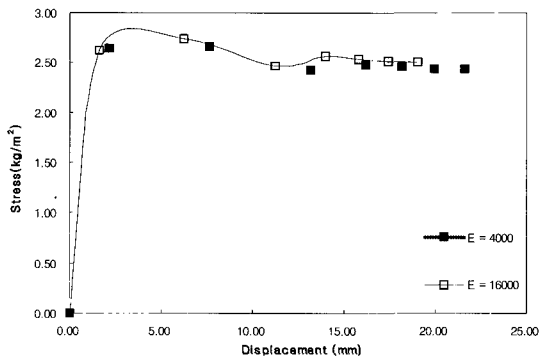


그림 16. 탄성계수별 변위에 따른 소성영역 ($E=16000 \text{ t/m}^2$)

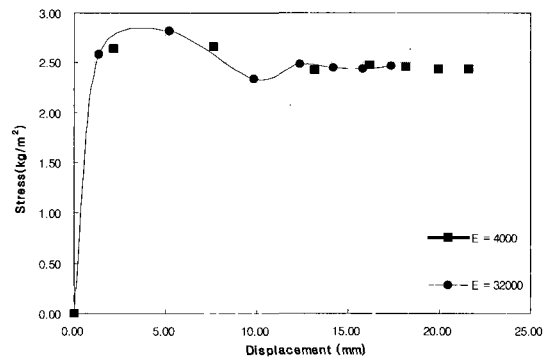


그림 17. 탄성계수별 변위에 따른 소성영역 ($E=32000 \text{ t/m}^2$)

3.5 현장실측자료와의 상관성 비교

그림 18은 천단보강후 강도증가에 대한 해외실측자료를 나타낸 것이다. 해외현장자료(가지마 건설)의 경우 탄성계수가 원지반강성의 6배일 때 응력 및 변위 모두 안정적으로 수렴하여 보강효과를 발휘 하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구대상의 지반조건 및 안전측 설계로 인한 차이로 보여지며, 배수에 의한 탄성계수의 기준은 원지반강성의 값에 따라 차이가 클 수 있으므로 응력에 대한 보완이 적절함을 알 수 있었다.

Table 1. Physical property values used in pre-ex cavation analysis.

| | C | E |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| | (kN/m (kN/m (deg) | (kN/m ²) |
| Photo 3. Entrance in starting shaft. | | |
| Buried soil (B) | 18 | 7,000 |
| Gravelly soil (Tg1) | 19 | 78,000 |
| Clayey soil (Tcl) | 19 | 120 |
| Gravelly soil (Tg1) | 19 | 40 |
| Steel support | 78.5 | 2.1 x 10 ⁸ |
| Shotcrete | 23 | 4.0 x 10 ⁶ |
| Forepile | Origin al ground | 1.0 x 10 ⁶ |
| Soil-cement column in foot region | Origin al ground | 5.0 x 10 ⁵ |

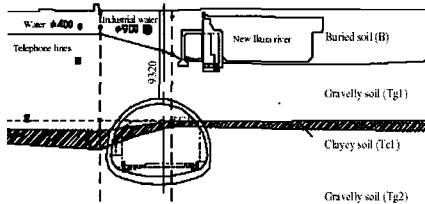


Figure 2. Geological cross section.

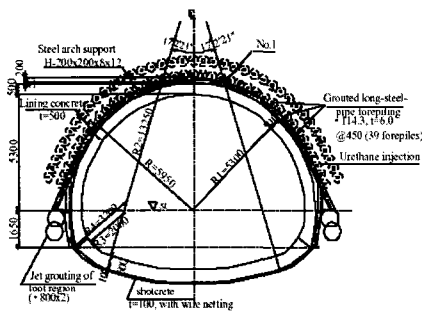


그림 18. 해외현장자료의 보강물성치검토

4. 결론

본 연구는 교대말뚝에 인접하여 터널상부에 대구경 강관 그라우팅시공시 설계조건에 만족하는 타당한 보강물성치를 평가하기 위하여 3차원 유한차분해석을 통한 매개변수연구를 수행하였다.

1. 3차원 해석을 통한 대구경 강관 그라우팅의 보강

물성치는 원지반강성의 8배인 E=4000 tf/m² 일 때 개략적인 지반보강효과가 발현되는 것을 확인 하였다.

2. 변위에만 의존한 평가가 아니라 탄성계수별 응력 수준에 따른 초기변위의 영향을 평가하여, 원지반 강성의 값에 따라 차이가 크게 나지 않게 응력에 대한 보완이 적절함을 알 수 있었다.
3. 응력과 변위의 상관관계에서 응력의 변곡점을 소성 영역으로의 전환부이라고 했을 때, 탄성계수가 원지 반강성의 약 8배일 때 응력 및 변위 모두 안정적으 로 수렴하며 보강효과를 발휘하는 것으로 판단된다.
4. 이상의 연구를 통해 얻은 결과를 다수의 현장 실측자 료와의 비교를 통해 타당한 보강물성치를 검증하는 것이 요구되며, 향후 연구로는 Closed Form Solution 으로 나타내어 다양한 조건일 때의 보강물성을 산정 및 제안하는 방법을 제시하여 설계기법의 다양화를 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

N. Loganathan and H. G. Poulos. (2002) Centrifuge modelling: tunnelling-induced ground movements and pile behaviour, *28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress*.

Ou. C. Y., Wu. T. S., and Hsieh H. S. (1996) Analysis of Deep Excavation with Column Type of Ground Improvement in Soft Clay, *ASCE Jour. of Geotech Eng., Vol 122. No.9. pp. 709-716*.

A. Yokoo, Y. Fuke and N. Fujii. (2002) Observational construction of the urban NATM under thin overburden, *Kajima Corporation*.

L. T. Chen,, H. G. Poulos,2 Fellow and N. Loganathan. (1999) Pile Responses Caused by Tunneling, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, March 1999, pp 207.

D. Peila, p.p. Oreste,S. Pelizza, A.Poma,S. (1996) Study of the influence of sub-horizontal fiber-glass pipes on the stability of a tunnel face, *North American Tunnelling '96 (Ozdemir eds.)*, pp 425-431.

Itasca consulting group, inc. (1997) Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, Version 2.0, Minnesota, USA.

◎ 논문접수일 : 2004년 3월 26일

◎ 심사의뢰일 : 2004년 4월 02일

◎ 심사완료일 : 2004년 5월 12일