

그라우팅에 의한 터널 보강효과의 해석적 연구

이종우¹⁾ · 이준석²⁾ · 김문겸³⁾

A Study on the Tunnel Stability using Grouting Technique

J. W. Rhee, J. S. Lee and M. K. Kim

ABSTRACT Grouting technique is frequently used where a tunnel structure is passing through the shallow overburden area or where the thickness of hard rock above the tunnel is rather thin. However, engineering background on design process of the grout reinforcement does not seem to be fully understood until now. Mechanics of composite material is, therefore, introduced in this study to investigate the orthotropic material properties of the composites containing soil (or rock) and grouting material. These orthotropic material properties can be used to represent the reinforcement effects quantitatively. The model developed in this study is next applied to a typical tunnel structure and the grouting effect is analyzed numerically. The idea used in this study can be expanded to a situation where a pipe roofing or a forepoling technique is adopted and a simplified design procedure, similar to the model introduced in this study, can be developed.

1. 서 론

연약지반이나 상부 경암층의 두께가 비교적 얇은 지역을 통과하는 터널의 경우, 그라우팅 공법 등에 의한 지반강화를 도모하게 되며 이 결과 지표면이나 터널 주위의 변위가 현저히 감소되는 경향을 보이게 된다. 또한 지하수가 문제되는 경우, 그라우팅에 의한 지하수 차단효과도 동시에 얻을 수 있다. 그러나 현재 우리나라에서 사용되고 있는 그라우팅과 같은 주입공법, 특히 독일의 Jähde 등이 고안하고 일본에서 개량된 Labile Wasser Glass(불안정유리, 이하 LW)공법에 대한 설계 과정이 미흡한 것이 사실이며 대부분의 경우, 그라우팅에 의한 지반강화 효과는 그라우팅재의 주입량에 관계 없이 주변 압반의 강성을 임의로 증가시킴으로써 그 영향을 모형화하고 있는 실정이다. 그러나 실제로는 그라우팅에 의한 강화효과는 주입하는 그라우팅재의 양에 의해 좌우될 수 있으며 이를 모형화 할 수 있는 이론적 배경이 필요하게 된다.

본 연구에서는 그라우팅에 의한 지반 강화의 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 복합체 역학(mechanics of composite material)에서 흔히 사용되는 변형률에너지 이론과 혼합체 기법(homogenization technique)

을 도입하기로 한다. 이를 위하여 주입되는 그라우팅재와 원지반 사이에는 완전한 부착이 이루어지며 원지반과 그라우팅재는 각각 균질·등방이라고 가정한다. 이들 가정과 평형방정식 및 적합방정식을 이용하면 원지반과 그라우팅재로 이루어진 복합체에 대한 직교 이방성 물성을 유도할 수 있게 되며, 이 때 직교 이방성 물성은 그라우팅재 주입량의 함수가 된다.

직교 이방성 모델은 현재 국내에서 널리 사용하고 있는 범용 프로그램인 FLAC의 해석 기능을 이용하기로 하고 그라우팅재에 의한 터널 주변부의 강화효과를 분석하였다. 그 결과 그라우팅재에 의해 지반을 강화한 경우, 원지반에 비하여 터널 주변부의 변위가 2배 이상 감소하는 경향을 보여 준다. 개발한 모델은 연약지반 터널의 강화 공법인 관과 다단 공법이나 forepoling 기법 등의 해석 및 설계에도 적용할 수 있을 것이며 추후 이에 대한 연구가 진행될 것이다.

2. 그라우팅재에 의한 원지반의 강화

그라우팅재를 이용하여 원지반을 강화시키는 공법에

- 1) 학생회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
- 2) 정회원, 한국고속철도건설공단
- 3) 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

는 여러 가지가 있을 수 있으며 본 절에서는 실제 현장에서 널리 사용되고 있는 LW공법을 위주로 그 공학적 특성을 논의하기로 한다. LW공법은 시멘트와 물유리(규산소다, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) 및 벤토나이트를 혼합한 약액 주입공법의 하나로서 차수 및 연약지반의 지지력 강화에 사용되고 있다.

LW공법에 의한 지반의 강화는 여러 가지 방법에 의해 그 효과를 판단할 수 있으며 주로 현장 시추공에 의하여 주입 효과를 검증하게 된다. 본 연구에서는 LW공법에 의한 지반 강화효과를 정량적으로 표현하기 위하여 두 가지 유사한 공학적 이론을 도입하기로 한다. 이를 위하여 원지반과 그라우팅재는 각각 등방, 균질하고 이들은 서로 완전히 부착되어 있다고 가정한다.

2.1 변형률 에너지 이론에 기초한 강화지반의 물성 도출

원지반 및 그라우팅재로 이루어진 복합 재료의 물성을 도출하기 위한 첫 번째 방법으로 변형률 에너지 이론을 도입하기로 한다. Fig. 1은 그라우팅을 실시한 대표적 지반을 표시하고 있으며 강화 지반의 물성을 도출하기 위하여 그라우팅재는 원지반에 균질하게 분포되어 있다고 가정한다. 우선 원지반(r)과 그라우팅재(g)의 체적비를 각각 μ_r 및 μ_g 라 하면

$$\mu_r + \mu_g = 1 \tag{1}$$

로 표시할 수 있으며 강화지반의 평균응력 및 평균변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \{\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yz}, \bar{\tau}_{zx}\}^T \tag{2}$$

$$\bar{\epsilon} = \{\bar{\epsilon}_x, \bar{\epsilon}_y, \bar{\epsilon}_z, \bar{\gamma}_{xy}, \bar{\gamma}_{yz}, \bar{\gamma}_{zx}\}^T \tag{3}$$

특히 x방향 평균응력 및 평균변형률은 다음과 같이

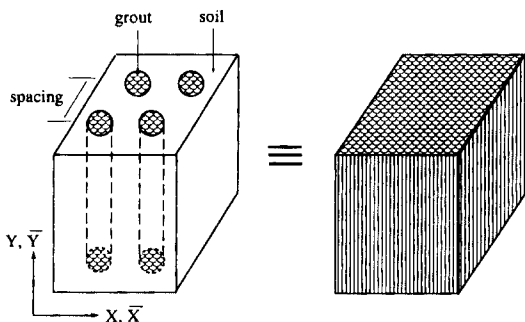


Fig. 1. Representative Elementary Volume of Grout Reinforced Soil.

표현할 수 있으며 여기서 V는 대표 체적을 의미한다.

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^2 \int_{V_i} \sigma_x dV \tag{4}$$

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^2 \int_{V_i} \epsilon_x dV \tag{5}$$

여기서 i=1은 원지반, i=2는 그라우팅재를 의미한다. 한편 등방·균질로 가정한 각 구성물질의 구성방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{xi} = \frac{1}{E_i} (\sigma_{xi} - \nu_i \sigma_{yi} - \nu_i \sigma_{zi})$$

$$\epsilon_{yi} = \frac{1}{E_i} (\sigma_{yi} - \nu_i \sigma_{xi} - \nu_i \sigma_{zi})$$

$$\epsilon_{zi} = \frac{1}{E_i} (\sigma_{zi} - \nu_i \sigma_{xi} - \nu_i \sigma_{yi})$$

$$\gamma_{xyi} = \frac{\tau_{xyi}}{G_i} \tag{6}$$

$$\gamma_{yzi} = \frac{\tau_{yzi}}{G_i}$$

$$\gamma_{zxi} = \frac{\tau_{zxi}}{G_i}$$

또한, 식 (6)을 강성도 행렬 관계식으로 나타내면,

$$\begin{aligned} \alpha_r &= [D^r] \epsilon_r \\ \alpha_g &= [D^g] \epsilon_g \end{aligned} \tag{7}$$

로 표현할 수 있다. 여기서 r은 원지반, g는 그라우팅재를 의미하며 [D]는 강성도 행렬을 나타낸다.

각 구성 물질에 대한 변형률 에너지의 합, U_{re} 와 강화 지반의 변형률 에너지, U_c 는 같다고 할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} U_{re} &= \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \int_{V_i} (\sigma_{xi} \epsilon_{xi} + \sigma_{yi} \epsilon_{yi} + \sigma_{zi} \epsilon_{zi} + \tau_{xyi} \gamma_{xyi} + \tau_{yzi} \gamma_{yzi} + \tau_{zxi} \gamma_{zxi}) dV_i \end{aligned} \tag{8}$$

$$U_c = \frac{1}{2} \int_{V_c} (\bar{\sigma}_x \bar{\epsilon}_x + \bar{\sigma}_y \bar{\epsilon}_y + \bar{\sigma}_z \bar{\epsilon}_z + \bar{\tau}_{xy} \bar{\gamma}_{xy} + \bar{\tau}_{yz} \bar{\gamma}_{yz} + \bar{\tau}_{zx} \bar{\gamma}_{zx}) dV \tag{9}$$

이며

$$U_{re} = U_c \tag{10}$$

로 된다. 여기서 원지반과 그라우팅재 사이의 평형조건 및 적합조건을 고려하면 다음과 같은 부가방정식 (auxiliary equation)을 도입할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_{xi} &= \bar{\sigma}_x \\
\bar{\sigma}_{xi} &= \bar{\sigma}_y + A_{yi} \\
\bar{\sigma}_{zi} &= \bar{\sigma}_z \\
\bar{\tau}_{xyi} &= \bar{\tau}_{xy} + A_{xyi} \\
\bar{\tau}_{yzi} &= \bar{\tau}_{yz} + A_{yzi} \\
\bar{\tau}_{zxi} &= \bar{\tau}_{zx}
\end{aligned} \quad (11)$$

및

$$\begin{aligned}
\bar{\varepsilon}_{xi} &= \bar{\varepsilon}_x + B_{xi} \\
\bar{\varepsilon}_{yi} &= \bar{\varepsilon}_y \\
\bar{\varepsilon}_{zi} &= \bar{\varepsilon}_z + B_{zi} \\
\bar{\gamma}_{xyi} &= \bar{\gamma}_{xy} \\
\bar{\gamma}_{yzi} &= \bar{\gamma}_{yz} \\
\bar{\gamma}_{zxi} &= \bar{\gamma}_{zx} + B_{zxi}
\end{aligned} \quad (12)$$

이며 벡터 A 및 B는 부가응력을 나타낸다. 이제 식 (4)와 (11) 및 식 (5)와 (12)로부터 A와 B를 구하고 이를 다시 식 (6) 및 (12)에 대입하면 강화 지반에 대한 물성을 다음과 같이 구할 수 있으며 이들은 그라우팅재 체적비의 함수로 된다.

$$\begin{aligned}
\bar{E}_x &= \frac{\delta}{\alpha^2 + \beta\delta} \\
\bar{E}_y &= \delta \\
\bar{E}_z &= \frac{\delta}{\alpha^2 + \beta\delta} = \bar{E}_x \\
\bar{\nu}_{xy} &= \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta\delta} \\
\bar{\nu}_{yz} &= \alpha \\
\bar{\nu}_{zx} &= \frac{\gamma\delta - \alpha^2}{\alpha^2 + \beta\delta} = \bar{\nu}_{xz} \\
\bar{G}_{xy} &= \mu_r G_r + \mu_g G_g \\
\bar{G}_{yz} &= \mu_r G_r + \mu_g G_g = \bar{G}_{xy} \\
\frac{1}{\bar{G}_{zx}} &= \frac{\mu_r}{G_r} + \frac{\mu_g}{G_g}
\end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
\alpha &= \mu_r \nu_r + \mu_g \nu_g \\
\beta &= \frac{\mu_r(1 - \nu_r^2)}{E_r} + \frac{\mu_g(1 - \nu_g^2)}{E_g} \\
\gamma &= \frac{\mu_r(\nu_r + \nu_r^2)}{E_r} + \frac{\mu_g(\nu_g + \nu_g^2)}{E_g} \\
\delta &= \mu_r E_r + \mu_g E_g
\end{aligned} \quad (14)$$

이다. 한편, 직교이방성인 강화지반의 속성상

$$\bar{\nu}_{ij} = \bar{\nu}_{ji} \frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_j} \quad (15)$$

와 같은 관계식을 적용할 수 있다.

강화지반에 대한 물성을 이용하여 응력 및 변형률을 구한 후 각 구성 물질에 대한 응력 및 변형률은 다음의 식으로부터 구할 수 있으며 이를 구조 행렬(structural matrix)이라 부른다.

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_r &= [S_r] \bar{\sigma} \\
\bar{\sigma}_g &= [S_g] \bar{\sigma}
\end{aligned} \quad (16)$$

구조행렬 [S]는 앞서 논의한 부가방정식과 구성방정식을 이용하여 구할 수 있으며 자세한 내용은 참고문헌 1에서 논의하기로 한다.

2.2 혼합체 기법을 이용한 강화지반의 물성 도출

앞서 논의한 변형률 에너지법과 유사한 방법으로 혼합체 기법(Homogenization Technique)을 이용할 수 있다. 이는 토목 재료 분야에 비교적 널리 사용되어온 기법으로서 최근 조적구조물의 거동 해석에 활용된 바 있다.²⁾ 다음은 혼합체 기법을 이용하여 강화 지반의 물성을 도출해 내는 과정을 나타낸다.

강화 지반의 응력-변형률 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma} = [D^{eq}] \bar{\varepsilon} \quad (17)$$

여기서, [D^{eq}]는 강화 지반의 강성도 행렬이며 강화 지반의 응력 및 변형률 요소는 식 (2) 및 (3)에 표시한 바와 같다. 혼합체 기법에 의한 강화 지반의 응력 및 변형률은 각 구성물질의 체적비의 함수로 표현될 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma} &= \mu_r \sigma_r + \mu_g \sigma_g \\
\bar{\varepsilon} &= \mu_r \varepsilon_r + \mu_g \varepsilon_g
\end{aligned} \quad (18)$$

로 된다. 이제 원지반과 그라우팅재의 경계면을 따른 평형방정식 및 적합방정식을 고려하면

$$[\delta_1] \bar{\sigma}_g = [\delta_1] \bar{\sigma}_r$$

$$[\delta_2] \bar{\sigma}_g = [\delta_2] \bar{\sigma}_r$$

여기서

$$[\delta_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [\delta_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

이며 식 (19) 및 (20)은 식 (11) 및 (12)와 부합한다. 윗 식은 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$[\delta_1]\sigma_i = [\delta_1][D^i] \epsilon_i = [E^i][\delta_2] \epsilon_i + [F^i][\delta_1] \epsilon_i \quad (21)$$

여기서 i 는 원지반 혹은 그라우팅재를 의미하며 각 행렬은 다음과 같다.

$$[\delta_1][D^i] = \begin{bmatrix} D_{11}^i & D_{12}^i & D_{13}^i & 0 & 0 & 0 \\ D_{31}^i & D_{32}^i & D_{33}^i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66}^i \end{bmatrix}$$

$$[E^i] = \begin{bmatrix} D_{12}^i & 0 & 0 \\ D_{32}^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[F^i] = \begin{bmatrix} D_{11}^i & D_{13}^i & 0 \\ D_{31}^i & D_{33}^i & 0 \\ 0 & 0 & D_{66}^i \end{bmatrix} \quad (22)$$

식 (19)로부터 식 (21)은

$$[E^i][\delta_2] \bar{\epsilon} + [F^i][\delta_1] \epsilon_i = [E^g][\delta_2] \bar{\epsilon} + [F^g][\delta_1] \epsilon_g \quad (23)$$

와 같이 변환되며 식 (18)은

$$[\delta_1] \epsilon_g = \frac{1}{\mu_g} [\delta_1] \bar{\epsilon} - \frac{\mu_r}{\mu_g} [\delta_1] \epsilon_i \quad (24)$$

로 된다. 이제 식 (24)를 식 (23)에 대입하면

$$[\delta_1] \epsilon_i = ([F^i] + \frac{\mu_r}{\mu_g} [F^g])^{-1} \{ \frac{1}{\mu_g} [F^g][\delta_1] + ([E^g] - [E^i])[\delta_2] \} \bar{\epsilon} = [\bar{T}] \bar{\epsilon} \quad (25)$$

로 되며 마지막으로

$$\epsilon_i = [T_i] \bar{\epsilon} \quad (26)$$

로 쓸 수 있다. 여기서

$$[T_i] = \begin{bmatrix} \bar{T}_{11} & \bar{T}_{12} & \bar{T}_{13} & \bar{T}_{14} & \bar{T}_{15} & \bar{T}_{16} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{T}_{21} & \bar{T}_{22} & \bar{T}_{23} & \bar{T}_{24} & \bar{T}_{25} & \bar{T}_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \bar{T}_{31} & \bar{T}_{32} & \bar{T}_{33} & \bar{T}_{34} & \bar{T}_{35} & \bar{T}_{36} \end{bmatrix} \quad (27)$$

이 된다. 그라우팅재에 대하여는 식 (18)과 (26)으로부터

$$\epsilon_g = [T_g] \bar{\epsilon} \quad (28)$$

이 되며 여기서

$$[T_g] = \frac{1}{\mu_g} [I] - \frac{\mu_r}{\mu_g} [T_i] \quad (29)$$

로 표현된다.

이제 강화지반에 대한 응력-변형률 관계식은 식 (18), (26), (29)로부터

$$\bar{\sigma} = \{ \mu_r [D^i][T_i] + [D^g]([I] - \mu_r [T_i]) \} \bar{\epsilon} = [D^{eq}] \bar{\epsilon} \quad (30)$$

로 된다. 식 (30)으로부터 강화지반의 물성은 각 구성물질의 물성 및 체적비의 함수임을 알 수 있다.

2.3 그라우팅재의 강화효과 분석

본 절에서는 앞에서 구한 강화지반의 물성과 원지반의 물성을 비교해 보기로 한다. 이를 위하여 균질, 등방재로 가정한 원지반을 연암과 경암인 경우로 나누어 비교해 보도록 한다. 각 암질의 전형적인 탄성계수, E_r 은 4,200 kg/cm²와 7,400 kg/cm²로 정하였고 각각의 포아송비, ν_r 은 0.30 및 0.27로 가정하였다. 한편 균질, 등방성으로 가정한 그라우팅재의 탄성계수, E_g 는 아직까지 그 성질이 실험적으로 규명되지 못하였으므로 연한 슛크리트의 탄성계수보다 작은 8,000 kg/cm²를 사용하기로 하며 포아송비, ν_g 는 0.18로 가정하였다. 여기서 경암의 경우, 탄성계수는 절리면이 없는 이상적인 상황을 가정한 경우로서 실제로는 절리의 영향으로 인해 이보다 낮게 될 것이며 이 절리를 통하여 그라우팅재가 침투하는 것으로 가정할 수 있다.

Fig. 2는 원지반을 연암으로 가정한 경우, 강화지반의 각종 물성을 도시하였다. Fig. 2(a) 및 식 (13)에서 볼 수 있는 바와 같이 수직 방향 탄성계수, E_v 는 그라우팅재의 체적비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하나 수평 방향 탄성계수, E_h 는 그라우팅재에 의한 영향이 상대적으로 작다고 할 수 있다. Fig. 2(b)의 전단 탄성계수의 경우도 비슷한 경향을 보이고 있다. 여기서 $E_x = E_z$, $G_{xy} = G_{yz}$ 의 관계가 성립하며 그라우팅재의 체적비 $\mu_g = 0$ 과 1인 경우는 각각 원지반과 그라우팅재만의 경우를 나타낸다. Fig. 3은 원지반을 경암으로 가정한 경우로서 수평방향 탄성계수도 거의 선형적으로 증가하게 된다. 이는 원지반과 그라우팅재의 탄성계수 차가

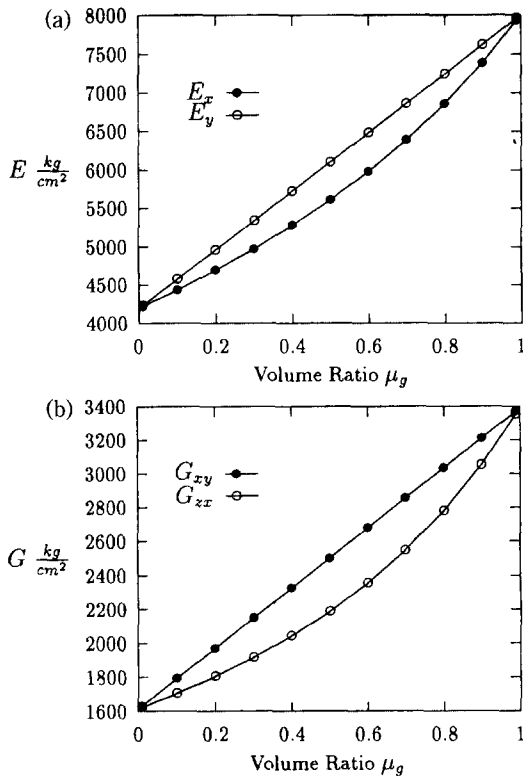


Fig. 2. Changes of Orthotropic Material Properties according to Volume Ratio, $E_x=4,200 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_x=0.30$, $E_g=8,000 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_g=0.18$.

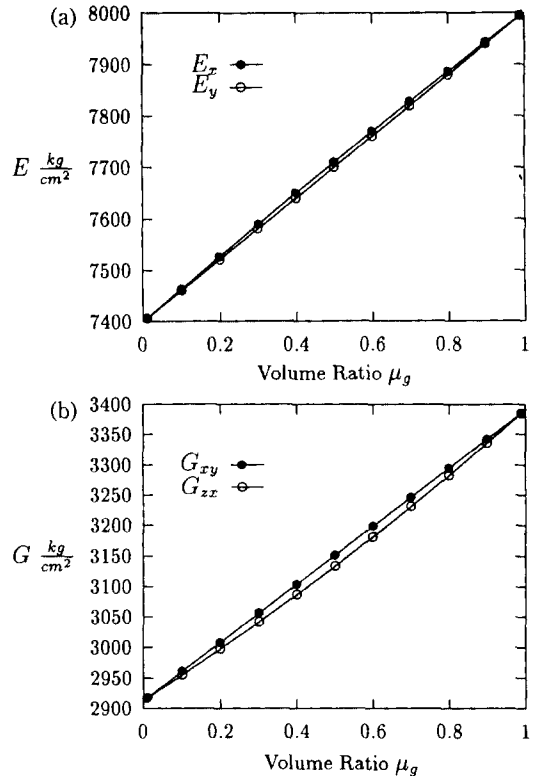


Fig. 3. Changes of Orthotropic Material Properties according to Volume Ratio, $E_x=4,200 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_x=0.30$, $E_g=8,000 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_g=0.18$.

작기 때문이기도 하지만 포아송비의 영향도 무시할 수 없음을 나타낸다. 그라우팅재에 의한 원지반의 강화효과는 실험적으로도 규명할 수 있으며 문헌에 의하면 탄성계수의 경우 2배 정도 증가하는 경우도 있는 것으로 알려져 있다.³⁾

이상에서 살펴본 바와 같이 그라우팅재에 의한 강화효과는 체적비의 함수로 나타낼 수 있으며 이를 통하여 보다 현실적인 연약지반의 보강 설계가 가능할 것으로 판단된다. 즉, 그라우팅재의 체적비, μ_g 혹은 주입률은 다음 식에 의해 산정할 수 있다.⁴⁾

$$\mu_g = n \chi (1 + \xi) \quad (31)$$

여기서, n 은 공극률, χ 은 주입 충전률이며 ξ 는 손실계수로서 충전률 χ 을 100%로 시공하는 경우에는 지반의 용기가 일어날 수 있으므로 대개 70-90% 범위내에서 가정하며 손실계수 ξ 는 추정치이므로 일반적으로 5-10% 정도를 사용한다.⁴⁾ 그라우팅재의 체적비가 결

정되면 강화지반의 직교 이방성(orthotropic) 물성을 산출할 수 있고 유한차분법 및 유한요소법 등에 의한 원지반의 강화효과를 직접 모형화할 수 있게 된다. 보다 자세한 내용은 다음 장의 적용 예에서 다루기로 한다.

한편 물유리계(LW) 그라우팅재를 사용하는 경우, 규산소다 및 물의 혼합체인 A액과 시멘트, 벤토나이트 및 물의 혼합체인 B액을 50:50으로 혼합하여 시공하는 경우가 대부분이다. 이 때, 3일 후의 일축압축강도는 대개 13 kg/cm^2 전후인 반면 7일 강도는 17 kg/cm^2 정도로 증가하게 되며 겔타임은 2분 30초 정도가 된다. 한편 B액의 양을 증가시키고 A액의 양을 감소시키면 일축압축강도 및 겔타임이 증가하게 된다.

3. 적용 예 : 표피가 낮은 터널에 대한 강화공법의 적용

본 절에서는 그라우팅재에 의한 원지반의 강화효과를

실제 현장조건에 적용하기 위하여 표피 및 상부 경암의 두께가 비교적 얇은 터널을 가정한 후 지반강화 전후의 거동을 분석해 보기로 한다. 이를 위하여 직교 이방성 물성을 산출하고 이를 유한차분 해석프로그램인 2차원 FLAC에 적용하기로 한다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 터널 단면이며 Fig. 5는 터널 주위의 상세도이다.

FLAC을 이용하여 보강 효과를 모의해석하기 위하여 해석모델중 분산형(ubiquitous) 절리모형 및 직교 이방성 물성모형을 사용하기로 한다. 즉, 원지반의 연암 및 경암에는 dip angle이 45°인 절리가 고루 분포하고 있다고 가정한 후 해석을 실시하기로 하고, 지반강화는 절리에 그라우팅재가 침투하였다고 가정하고 보강지역에 대한 직교 이방성 물성모형을 사용함으로써 그 효과를 나타내기로 한다. 여기서 한가지 유의할 점은 FLAC의 직교 이방성 모형은 탄성 해석만이 가능하다는 것이다. 그러나 보강지역의 탄소성 해석을 위하여는 보다 복잡한 복합체 탄소성이론을 고려하여야 하며 탄성 및 소성영역에 대한 평형 및 적합방정식을 만족시

키는 특별한 수치해석 기법 등이 요구되나 본 연구에서는 제외하기로 한다. 복합체 탄소성이론에 대하여는 참고문헌 5 등을 참고할 수 있을 것이다. 따라서 금번 수치해석 과정에서는 보강지역에 대하여는 탄성해석만을 실시하고 기타 원지반 지역은 탄소성해석을 실시하였다. Table 1 및 Table 2는 수치해석에 사용된 각종 물성을 표시하고 있다. 여기서 C_i 및 ϕ_i 는 절리면의 점착력 및 마찰각을 나타낸다. 한편 그라우팅재의 체적비를 산출하기 위하여 공극률 0.2, 충전률 0.9, 손실계수 10%를 가정하였으며 그 결과 체적비, μ_g 는 0.2로 산정하였다.

Fig. 6은 해석에 사용된 FLAC 절점망을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 전체 영역을 8등분 하여 다단면 굴착에 따르는 터널내 5개 영역과 연암 및 경암층에 걸치는 그라우팅재 2개 영역 및 외부 영역으로 나누어 해석을 실시하였으며 해석 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 그라우팅재의 영향에 의하여 터널 주변 변위가 현저히 감소하였으며 소성영역도 크게

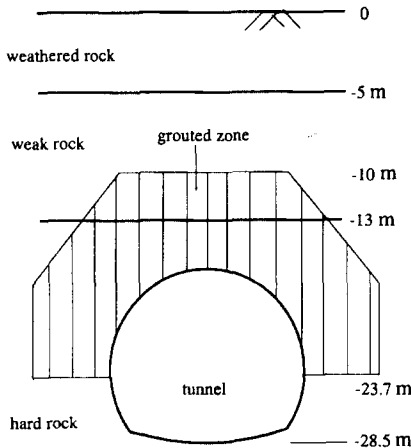


Fig. 4. Section View of Tunnel Area.

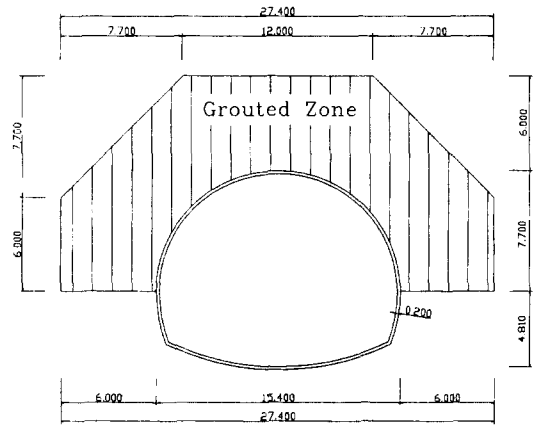


Fig. 5. Details of Grout Reinforced Tunnel Section (unit: mm).

Table 1. Rock Properties used in FLAC Analysis

| Rock | Depth | Density | Young's modulus | Poisson's ratio | C_i | ϕ_i | C_j | ϕ_j |
|-------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| | m | kg/m ³ | kg/cm ² | - | kg/cm ² | ° | kg/cm ² | ° |
| Weathered rock | ~-5.0 | 2.7 | 540 | 0.35 | 0.04 | 20 | - | - |
| Soft rock | ~-13.2 | 2.8 | 4,200 | 0.30 | 0.1 | 25 | 0.02 | 30 |
| Hard rock | ~-80.0 | 3.0 | 7,400 | 0.27 | 0.4 | 35 | 0.1 | 45 |
| Soft rock (Orthotropic) | -10.0~-13.2 | 2.9 | $E_x=4,697$ $E_y=4,960$ | $\nu_{xy}=0.26$ $\nu_{xz}=0.30$ | - | - | - | - |
| Hard rock (Orthotropic) | -13.2~-23.7 | 3.2 | $E_x=7,527$ $E_y=7,520$ | $\nu_{xy}=0.25$ $\nu_{xz}=0.26$ | - | - | - | - |

Table 2. Shotcrete Properties used in FLAC Analysis

| Material | Young's modulus | Thickness | Moment of inertia |
|----------------|--------------------|-----------|-------------------|
| | kg/cm ² | m | m ⁴ |
| Soft shotcrete | 50,000 | 0.05 | 0.00001 |
| Hard shotcrete | 150,000 | 0.15 | 0.00028 |

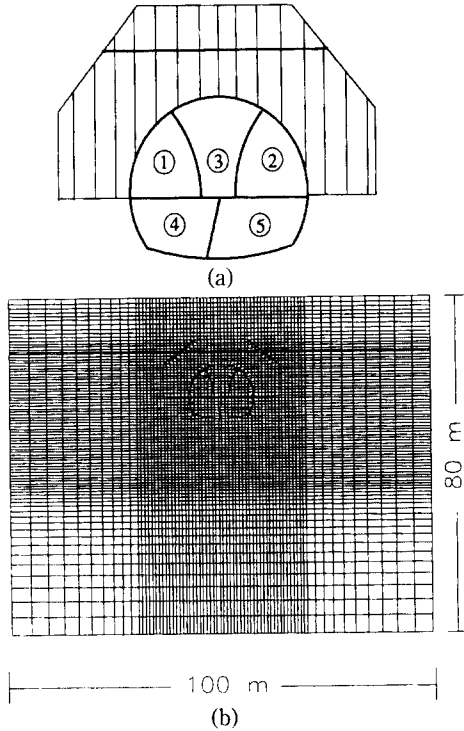


Fig. 6. Analysis of Grout Reinforced Tunnel
(a) excavation sequence
(b) FLAC grid used in the analysis.

감소하였음을 알 수 있다. 이는 해석용 프로그램이 직교 이방성 물체에 대한 탄소성 해석을 수행하지 못하였기 때문이기도 하지만 그라우팅재에 의한 지반강화 효과의 영향도 큰 것으로 사료된다. 터널의 굴착이 완료된 후 터널 주요부위의 변위 양상은 Table 3과 같다.

Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 그라우팅재에 의한 변위는 원지반보다 2배 이상 감소하는 경향을 보이고 있다. 수치 해석에 관한 보다 자세한 내용은 참고문헌 1에 수록하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 표피가 낮고 상부 경암층의 두께가 얇

Table 3. Displacement around the Tunnel (Unit: cm)

| Location | Without reinforcement | Grout reinforced rock |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Crown | 3.12 | 1.15 |
| S.L. (Horizontal) | 2.38 | 0.86 |
| Between Crown & Invert (Vertical) | 4.61 | 2.61 |

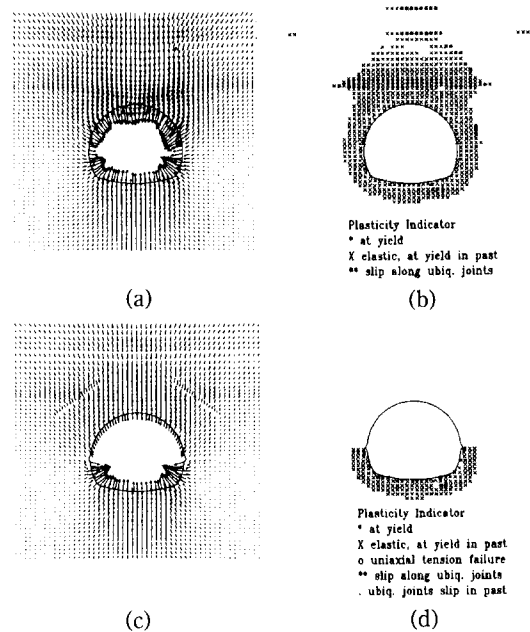


Fig. 7. Displacement Pattern and Plasticity History near Tunnel boundary
(a) displacement pattern without grouting,
(b) plasticity history without grouting,
(c) displacement pattern with grouting,
(d) plasticity history with grouting.

은 지역을 통과하는 터널의 보강방안으로 사용되고 있는 그라우팅 강화공법에 대한 고찰을 통하여 보강설계 방안을 제시하였다. 이를 위하여 그라우팅재 유입량의 함수로 표현된 보강지반의 직교 이방성 물성을 도출하였으며 실제 현장조건을 고려한 터널의 해석을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

그라우팅재와 원지반의 복합체를 고려한 직교 이방성 물성을 도출하였으며 이는 그라우팅재의 함수로 표현된다. 즉, 그라우팅재 주입량에 따라 강화 지반의 물성이 변화하게 된다.

실제 터널의 강화 효과를 분석하기 위하여 그라우팅재의 체적비를 0.2로 가정하여 FLAC을 이용한 수치해석을 실시하였다. 그 결과 터널 주변 변위의 양상은

2배 이상 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 사용한 혼합체 기법은 터널의 강화에 사용되는 다른 여러 공법에도 적용될 수 있을 것이다. 즉, 강관 다단공법이나 forepoling 등에 사용되는 강관, 그라우팅재 및 원지반에 대하여 혼합체 기법을 적용한 후 이들 복합체에 대한 직교 이방성 물성을 도출하게 되면 3차원 해석을 실시하지 않더라도 비교적 정확한 해석 결과를 기대할 수 있을 것으로 사료되며 추후 이에 대한 연구가 계속될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 두산건설의 후원으로 수행되었으며 인용된 실험값들의 일부는 (주)신한 관계자의 협조로 이루어졌음을 밝혀둔다. 본 연구에 관련한 여러분들께 심심한 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 이준석, 1996, Shallow Tunnel의 보강설계에 관한 연구, Internal Report CT 96-2, 한국고속철도건설공단, To be published.
2. S. Pietruszczak and X. Niu, 1991, A Mathematical Description of Macroscopic Behaviour of Brick Masonry, Int. J. Solids Struc., Vol.29, pp. 531-546
3. K. Kikuchi and Y. Mito, 1995, Case Study on the Mechanical Improvement of Rock Masses by Grouting, Ed. R. Yoshinaka & K. Kikuchi, Proc. Int. Workshop on Rock Foun., Tokyo, pp. 393-397
4. 천병식, 1995, 지반주입공법, 원기술
5. J. S. Lee and G. N. Pande, 1996, Analysis of Stone-Column Reinforced Foundations, submitted to Int J. Num. Anal. Meth. Geomech.