

철도터널내 조적식 라이닝의 모형화에 관한 연구

Modeling of Old Masonry Lining in Railroad Tunnels



이준석*
Lee, J. S.



신현곤*
Shin, H. K.



김무일*
Kim, M. I.

Abstract

The behavior of the masonry lining is studied to gain basic information on how to reinforce the masonry tunnels. Apart from the previous works on the masonry structures, the multi-course masonry structure, realistic in field condition, is considered and the constitutive relationship of the masonry is, therefore, established. The design charts of the orthotropic material properties are proposed according to the stiffness ratio and the crack initiation and subsequent propagation model is also considered to model the brittle nature of the masonry. A numerical analysis on the masonry panel is investigated to verify the proposed model and future works of the masonry lining are briefly explained.

Keywords : Multi-course masonry lining, Railroad tunnel, Homogenized crack model

*1 정회원, KRRl

*2 (주) 대우건설

*3 서울산업대학교 철도기술대학원장

요 지

본 연구에서는 재래식 철도터널의 라이닝재로 사용된 조적식 구조물의 해석기법에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 기존의 조적식 구조물 모형화 과정과는 다르게 다층 조적조에 대한 해석기법을 제안하였으며 조적의 각종 비등방 물성을 도표화하여 현장에서 손쉽게 적용가능하도록 하였다. 조적조내 균열발생 경우를 고려하여 다층 조적조의 분산형 균열모형을 제안하였으며 균열전파 모형도 함께 고려하였다. 수치해석을 통하여 제안한 모형의 적정성을 검증하였으며 향후 연구방향에 대하여 간단히 언급하였다.

주요어 : 다층 조적식 라이닝, 철도터널, 분산형 균열모형

1. 서론

재래식 철도터널의 지보재로 적용된 바 있는 조적식 라이닝은 그 구성재료에 따라 적벽돌 혹은 화강암 등과 같은 석재로 대별되며 터널 주변 지질조건에 따라 반경방향으로 약 3~6층 정도의 두께로 설계되었다. 그러나 공용기간이 증가함에 따라 조적식 터널의 유지보수가 필요하며 특히 현재 지진대비 구조물 보강의 일환으로 추진중인 철도구조물의 내진보강 방안은 조적식 터널 및 교각의 거동에 대한 실질적인 해석 및 설계기법을 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이 점에 착안, 철도터널내 조적식 라이닝에 대한 현실적인 해석기법을 개발하여 보강설계에 손쉽게 적용할 수 있도록 하였다.

기존의 조적식 구조물 해석기법은 조적의 두께가 단층인 벽체와 같이 비교적 간단한 구조물에 한정하여 개발된 바 있으나 조적식 라이닝과 같은 다층 구조물에 대하여는 새로운 접근방법이 요구된다. 물론 단층 조적체와 인접 배면줄눈을 따로 모형화하여 다층 조적체의 해석 및 보강설계에 적용할 수도 있으나 구조물의 형태가 복잡하고 주기성을 포함하지 못하는 경우에는 곤란한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 다층 조적식 라이닝에 초점을 맞추어 거동분석 및 보강설계에 필요한 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 적벽돌 등의 원재료 및 횡줄눈, 종줄눈과 배면줄눈을 각각 고려하여 하나의 복합체로 가정하였으며 이를 통해 조적체의 비등방 물성을 도출하였다. 이로 부터 각각의 개체에 대한 구조관계식을 유도할 수 있으며

이는 조적체의 탄소성 거동분석에 적용될 수 있다. 조적체의 탄소성 거동을 위하여 균열의 발생 및 전파를 모형화할 수 있는 분산형 균열모형을 도입하였으며 이를 다층 조적체에 적용가능하도록 변형하였다.

개발된 모형은 실제 해석 및 보강설계에 손쉽게 적용가능하도록 도표화하였으며 실제 문제에 적용하여 모형을 적정성을 검증하였다. 한편 본 연구결과를 기초로 지진 등에 대한 조적식 터널의 보강방안 및 보강후 안정성을 검토할 수 있을 것으로 판단되며 향후 이에 대한 연구가 지속될 예정이다.

2. 기존의 연구동향

조적식 건물 및 터널 라이닝을 포함한 조적식 구조물의 해석방법은 크게 세 가지로 대별될 수 있다. 첫 번째 방법은 유한요소법을 이용한 고전적인 기법으로서 석재 혹은 적벽돌과 모르터를 각기 모형화하여 연속체 역학의 범주 내에서 해석하는 것으로서 Ali & Page (1988)의 방법이 이에 속한다. 이 방법을 이용하여 조적식 구조물의 거동을 분석할 경우에는 석재 및 모르터의 탄성계수 차이가 현저하므로 두 구성체의 경계지역에서는 엄밀한 요소망이 요구된다.

조적식 구조물의 거동을 파악하기 위한 두 번째 방법은 조적식 구조물의 주기성을 이용하여 벽돌 및 인접 모르터를 하나의 cell로 가정한 후 이에 대한 특성을 수학적으로

모형화하고 전체 조적식 구조물에 걸쳐 적용하는 것으로서 macroscopic 모형화 기법이라고도 할 수 있다. 여기에는 Lee 등 (1998) 이 종합한 3가지 분산형 모형이 있으며 각각의 장·단점이 함께 기술되어 있다. 한편 Lopez 등 (1999) 은 평면응력 조건을 사용하여 4가지 가능한 응력조합하의 단위 cell에 대한 구성방정식을 유도하였고, Cecchi & Rizzi (2001) 는 벽돌 및 인접 모르타르로 구성된 단위 cell 주위의 평형 및 적합방정식을 도입하여 조적식 구조물에 대한 경계치 문제를 해석한 바 있다.

마지막으로 Lotfi & Shing (1994) 및 Gambarotta & Lagomarsino (1997a) 는 모르타르에 대하여 경계면 (Interface) 요소를 적용하여 조적식 구조물을 해석하였으며 이와 아울러 연속체 역학에 기초한 해법을 함께 고려하였다 (Gambarotta & Lagomarsino, 1997b). 또한 Casolo (2000)는 조적식 벽체 구조물에 대하여 벽체간 경계면에 경계면 요소를 삽입하여 전체 구조물의 거동을 살펴보았다.

이와는 별개로 개별요소법 (Discrete Element Method)을 적용할 수도 있으나 널리 적용되지 못하고 있으며 최근에 한계해석법 (limit analysis)을 이용한 해석 기법 (Sutcliffe 등, 2001) 도 제시된 바 있다. 한편 벽체식 조적식 구조물의 경우, 경계조건이 비교적 간단하다면 극한하중 (ultimate load) 해석법에 의한 근사해석이 가능하며 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으나 (Sinha, 1980) 아치형 조적식 구조물의 경우에는 적용이 곤란한 단점이 있다.

앞서 논의한 여러 접근 방법들은 조적식 구조물의 두께가 1층인 경우에 한하여 적용이 가능하며 공용중인 철도 터널 등과 같이 4~6층 (course) 으로 구성된 조적식 라이닝에 대하여는 새로운 해석방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 앞서 논의한 Lee 등 (1998) 의 연구결과를 기초로 다층 조적식 라이닝의 해석 모형을 제안하였다. 한편 조적식 라이닝의 거동이 탄성영역을 초과하는 경우 탄소성 해석을 실시하여야 하며 이에 Lee 등 (1996) 에

의한 microscopic 해석기법 및 Lourenco 등 (1998) 의 비등방 항복함수를 들 수 있다. 본 연구에서는 Lee 등 (1996)의 해석기법을 개선하여 다층 조적식 라이닝의 탄소성 해석기법을 제안하였으며 조적조에 대한 비등방 항복함수의 적용은 Lee 등 (2001)에서 제시한 기법을 토대로 하면 가능할 것으로 판단되나 본 연구에서는 고려하지 않았다.

한편 탄소성 해석결과, 조적식 라이닝의 특정 영역에서 소성 영역이 발생하는 경우, 조적식 구조물의 특성상 인장 혹은 전단에 의한 균열의 발생 (Lee 등, 1996) 으로 모형화할 수 있으며 이 균열의 전파양상 및 극한 하중도 유도할 수 있다. 균열의 전파는 유한요소법의 균열요소를 적용하여 모형화할 수도 있고 Lee 등 (1996)에서 제안한 분산형 균열모형을 적용할 수도 있으며 본 연구에서는 후자를 택하여 균열발생 이후 조적식 라이닝의 균열전파 및 항복강도 추정에 적용하였다.

3. 다층 조적식 라이닝의 해석모형 개발

본 장에서는 조적식 라이닝 터널과 같이 여러 층으로 구성된 조적식 구조물의 모형화 기법 및 탄소성 해석기법에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 앞에서 설명한 여러 해석기법 중 변형률 에너지법을 적용하여 다층 조적식 라이닝의 비등방 물성을 도출하였으며 벽돌 및 모르타르로 구성된 복합체의 micro level 항복함수를 고려하여 탄소성 해석기법을 제안하였다.

3.1 조적식 구조물의 비등방 물성

그림 1은 1900년대 초반에 시공된 전형적인 철도터널 단면을 나타낸다. 일반적으로 터널 입출구는 5~6층 규모의 조적식 라이닝이 설치되고 터널 중간부로 갈수록 조적의 층수가 작아지며 그림과 같이 3층 정도의 조적식 라

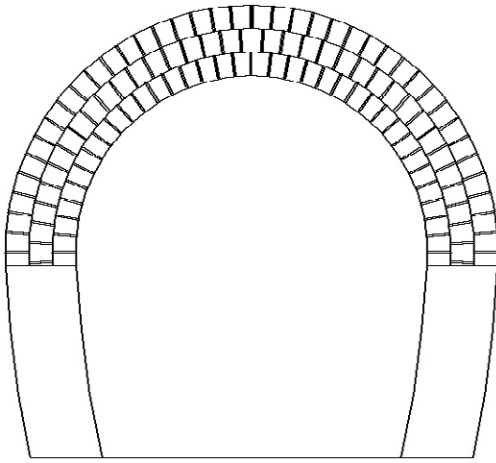


그림 1. 조적식 라이닝을 포함한 전형적인 철도터널의 예

이닝도 시공되었다. 다층 조적식 라이닝의 비등방 물성을 도출하기 위하여 그림 2와 같이 벽돌 및 모르터 각각을 별개의 구성체로 가정하였으며 특히 모르터의 경우, 횡줄눈 (bed joint), 종줄눈 (head joint) 및 배면줄눈 (course joint) 을 따로 구분하여 총 4개의 구성체를 모형화 하였다.

Lee 등 (1998)의 접근법 중 변형률 에너지법을 응용하면 다층 조적식 구조물의 비등방 물성을 구할 수 있다. 우선 그림 2(a)의 조적식 구조물 전체에 대한 응력/변형률 관계식은 다음과 같이 표현되고

$$\bar{\sigma} = [\bar{D}] \bar{\varepsilon} \quad (1)$$

여기서 응력/변형률 요소는 다음 식과 같으며

$$\bar{\sigma} = \{ \bar{\sigma}_{xx}, \bar{\sigma}_{yy}, \bar{\sigma}_{zz}, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yz}, \bar{\tau}_{zx} \}^T \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon} = \{ \bar{\varepsilon}_{xx}, \bar{\varepsilon}_{yy}, \bar{\varepsilon}_{zz}, \bar{\gamma}_{xy}, \bar{\gamma}_{yz}, \bar{\gamma}_{zx} \}^T$$

식 (1)의 강성도 행렬을 편의상 유연도 행렬 $[\bar{C}] = [\bar{D}]^{-1}$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$[\bar{C}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} - \frac{\bar{\nu}_{xy}}{E_x} - \frac{\bar{\nu}_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\bar{\nu}_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} - \frac{\bar{\nu}_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\bar{\nu}_{zx}}{E_z} - \frac{\bar{\nu}_{zy}}{E_z} & 0 & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

다음으로 그림 2(c)와 같이 종줄눈을 포함한 조적식 라이닝 시편을 도입한 후, 줄눈과 벽돌은 서로 견고히 부착되어 있다고 가정하면 다음과 같은 평형 및 적합방정식을 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_{xi} &= \alpha_x^{(i)} + A_{xi} \\ \alpha_{yi} &= \alpha_y^{(i)} \\ \alpha_{zi} &= \alpha_z^{(i)} + A_{zi} \\ \tau_{xyi} &= \tau_{xy}^{(i)} \\ \tau_{yzi} &= \tau_{yz}^{(i)} \\ \tau_{zxi} &= \tau_{zx}^{(i)} + A_{zxi} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xi} &= \varepsilon_x^{(i)} \\ \varepsilon_{yi} &= \varepsilon_y^{(i)} + B_{yi} \\ \varepsilon_{zi} &= \varepsilon_z^{(i)} \\ \gamma_{xyi} &= \gamma_{xy}^{(i)} + B_{xyi} \\ \gamma_{yzi} &= \gamma_{yz}^{(i)} + B_{yzi} \\ \gamma_{zxi} &= \gamma_{zx}^{(i)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 아래첨자 i 는 각 구성체로서 $i = 1$ 인 경우 벽돌, $i = 2$ 인 경우 종줄눈을 의미하며 위첨자 (1)은 고려하고

있는 경우가 종줄눈 및 벽돌의 복합체임을 나타낸다. 또한 A 및 B는 구하고자 하는 부가 응력 (auxiliary stress) 및 부가 변형률 (auxiliary strain)을 의미한다. 식 (4) 및 식 (5)의 부가 응력/변형률을 구하기 위하여 다음과 같은 변형률 에너지를 도입한다. 즉, 복합체의 변형률 에너지와 각 구성체의 변형률 에너지의 합은 같으므로

$$U_{re} = U_e \quad (6)$$

이고 여기서,

$$U_{re} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \int_{V_i} (\alpha_{xi} \varepsilon_{xi} + \alpha_{yi} \varepsilon_{yi} + \dots + \tau_{zxi} \gamma_{zxi}) dV_i \quad (7)$$

$$U_e = \frac{1}{2} \int_V (\bar{\alpha}_x \bar{\varepsilon}_x + \bar{\alpha}_y \bar{\varepsilon}_y + \dots + \bar{\tau}_{zx} \bar{\gamma}_{zx}) dV$$

와 같다. 여기서 V는 종줄눈 및 벽돌 전체의 체적이며 각각의 체적비는

$$\mu_b = \frac{1}{1 + t_{hj}} ; \quad \mu_{hj} = \frac{t_{hj}}{1 + t_{hj}} \quad (8)$$

와 같다. 여기서 1은 벽돌의 길이, t_{hj} 는 종줄눈의 두께를 의미한다. 식 (7)로부터

$$\bar{\alpha}_x = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^2 \int_{V_i} \alpha_{xi} dV_i \quad (9)$$

$$\bar{\varepsilon}_x = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^2 \int_{V_i} \varepsilon_{xi} dV_i$$

와 같으며 이는 복합체 역학의 평균 응력/변형률 개념에 상응한다. 위의 식 (4), (5) 및 (9)로부터 벽돌 및 종줄눈으로 구성된 복합체의 비등방 물성을 유도할 수 있으며 부가 응력/변형률을 계산함으로써 각 구성체의 응력/변형률도 유도할 수 있다.

상기 식 (4) 및 식 (5)를 그림 2(d) 및 2(e)에 적절히 변형하여 2회 더 적용하면 최종적으로 구하고자 하는 다층 조

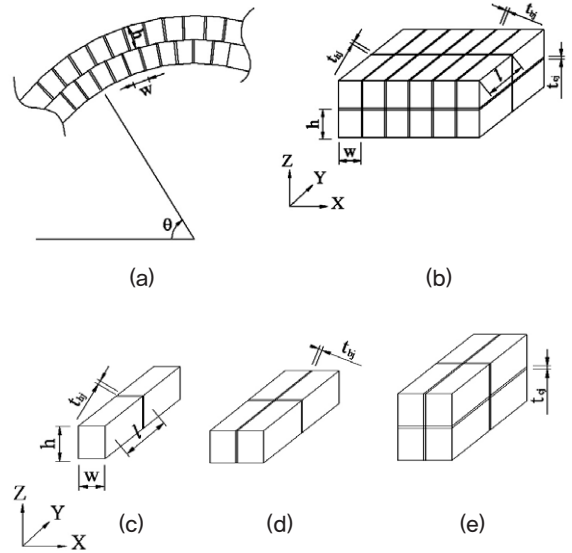


그림 2. 조적식 라이닝의 모형화 과정

적식 구조물의 비등방 물성치를 유도할 수 있으며 다음 식 (10)에 표현된 구조 관계식 (structural matrix) 도 유추할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_b &= [S_b] \bar{\sigma} \\ \sigma_{bj} &= [S_{bj}] \bar{\sigma} \\ \sigma_{hj} &= [S_{hj}] \bar{\sigma} \\ \sigma_{cj} &= [S_{cj}] \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 아래첨자 b, bj, hj 및 cj 는 각각 벽돌, 횡줄눈, 종줄눈 및 배면줄눈을 의미하며 참고로 부록 I에 식 (3)의 $\bar{\varepsilon}_x$ 를 상세히 기술하였다. 앞서 도출한 비등방 물성 및 구조 관계식은 각 구성체의 물성, 즉 각각의 탄성계수 및 포아송비, 와 체적비, 즉 벽돌의 크기 및 줄눈 두께의 함수로 표현되며 다음 장에서 이에 대한 매개변수 해석을 실시하여 각 변수에 대한 민감도를 조사하였다.

한편 식 (10) 및 비등방 물성은 그림 2(b)와 같이 이상적인 경우에 해당되며 그림 2(a)와 같이 아치부를 형성하는 경우, 축변환 과정을 거쳐야 한다. 실제 유한요소 해석 프

로그래 등)에 조적식 요소를 첨가하는 경우, 아치부의 중심을 입력하고 조적식 요소의 적분점 (Gauss point) 과 중심점의 좌표를 근거로 변환각 θ 를 결정한다. 이후 전체 강성도 행렬 구축시 축변환을 실시하고 각 구성체의 응력/변형률이 필요한 경우, 다시 축변환 과정을 거쳐 국부좌표계 내의 응력/변형률을 유도할 수 있다.

3.2 조적식 구조물의 탄소성 해석기법

앞 절에서 유도한 비등방 물성과 식 (10)을 사용하면 다층 조적식 구조물내 각 구성체의 응력/변형률을 유도할 수 있다. 한편 각 구성체의 응력/변형률로부터 각각의 항복함수를 이용하여 탄소성 해석을 실시할 수 있고 이는 Lee 등 (1996)에서 보인 micro level 항복함수 등과 유사하다. 일반적으로 탄소성 해석에 있어서 조적식 구조물은 점착력을 포함한 Mohr-Coulomb 항복함수를 일부 변형하여 최대 인장 주응력 항을 도입하면 실험 결과와도 부합함을 알 수 있다 (Lee 등, 1998). 이와는 별도로 복합체의 탄소성 해석은 macro level에서도 고려할 수 있다. 특히 Lee 등 (2001)에서 고려한 바 있는 비등방 복합 항복함수는 조적식 구조물의 탄소성 해석에 적용될 수 있으나 본 연구에서와 같이 고려하여야 하는 구성체의 개수가 4개인 경우, 정식화하는데 어려움이 따른다. 한편 Lourenco 등 (1998) 과 같이 Hill type 항복함수를 고려할 수도 있으나 각 주응력 방향별 인장 및 압축력을 산정해야 하는 어려움이 따른다. 또한 균열 발생시 경계 (surface) 요소를 이용해서 전파양상을 모형화할 수도 있으나 (Guinea 등, 2000) 유한요소망을 매번 조정해야 하는 등의 단점이 내포되어 있다. 다음에서는 Lee 등 (1996)에서 다룬 바 있는 인장파괴 모형을 확대하여 인장 및 전단파괴에 따른 균열전파 모형을 정립하였으며 특히 다층 조적식 구조물에 대한 적용성을 살펴보았다.

조적식 구조물의 탄소성 해석결과 소성 변형률이 발생하였다면 이는 조적체의 특성상 인장 혹은 전단에 의한

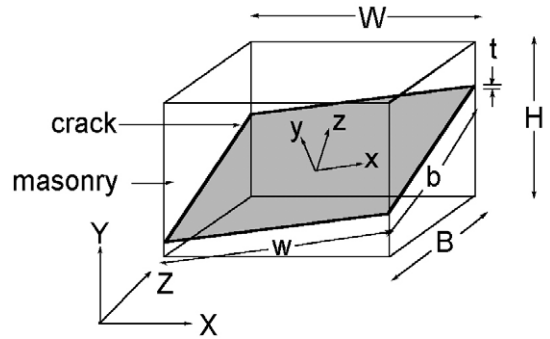


그림 3. 조적식 구조물의 균열 모형

균열의 발생으로 간주할 수 있으며 다음과 같은 이산화 과정을 거쳐 균열의 전파모형을 정식화할 수 있다. 우선 그림 3과 같이 벽돌 및 줄눈의 복합체내에 인장 혹은 전단균열이 발생하였다면 균열을 포함한 조적식 구조물의 응력 및 변형률, 즉 $\check{\sigma}$ 및 $\check{\epsilon}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 편의상 rate 형식을 따로 표기하지 않았다.

$$\begin{aligned} \check{\sigma} &= \mu_i \bar{\sigma} + \mu_j \sigma^j \\ \check{\epsilon} &= \mu_i \bar{\epsilon} + \mu_j \epsilon^j \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 및 σ^j 는 각각 식 (1)의 조적식 구조물에 대한 응력 및 균열내 응력을 의미하며 아래 첨자 i 및 j는 각각 조적체 및 균열의 체적비를 의미한다. 그림 3에 따라 균열의 방향에 따른 평형 및 적합방정식을 유도하면

$$\begin{aligned} \check{\sigma}_y &= \bar{\sigma}_y = \sigma_y^j \\ \check{\tau}_{xy} &= \bar{\tau}_{xy} = \tau_{xy}^j \\ \check{\tau}_{yz} &= \bar{\tau}_{yz} = \tau_{yz}^j \\ \check{\epsilon}_x &= \bar{\epsilon}_x = \epsilon_x^j \\ \check{\epsilon}_z &= \bar{\epsilon}_z = \epsilon_z^j \\ \check{\gamma}_{xz} &= \bar{\gamma}_{xz} = \gamma_{xz}^j \end{aligned} \tag{12}$$

와 같다. 균열의 폭은 인근 조적식 구조물의 대표체적에 비해 무시할 수 있을 정도이므로 균열의 변형률 대신 속

도 불연속계 (velocity discontinuity) g 를 도입한다. 이 경우, 식 (11)의 변형률 관계식은 식 (12)에 의해 다음과 같이 변형되고

$$[\delta]\check{\boldsymbol{\varepsilon}} \approx [\delta]\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mu \mathbf{g} \quad (13)$$

여기서,

$$[\delta] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \mu = \frac{bw}{BWH} \quad (14)$$

와 같다. 한편 조적식 구조물의 응력-변형률 관계식은 식 (1)과 같고 균열에 대하여는

$$[\delta]\boldsymbol{\sigma}^j = [K]\mathbf{g} \quad (15)$$

와 같이 쓸 수 있으며 여기서 소성 변형률에 의한 균열전파 직전의 경우,

$$[K] = [K^e] = \begin{bmatrix} K_N & 0 & 0 \\ 0 & K_{S1} & 0 \\ 0 & 0 & K_{S2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

와 같다.

균열을 포함한 조적식 구조물의 응력-변형률 관계식을 유도하기 위하여 식 (12)를 적용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \check{\boldsymbol{\sigma}} &= \mu_i \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \mu_i \boldsymbol{\sigma}^j \\ &\approx \bar{\boldsymbol{\sigma}} \\ &= [\bar{D}]S_1^i \check{\boldsymbol{\varepsilon}} = [\check{D}] \check{\boldsymbol{\varepsilon}} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, 구조관계식 S_1^i 은 균열 발생 전후의 조적식 구

조물에 대한 변형률의 비로서 Lee 등 (1996)의 식을 참조할 수 있다.

3.3. 균열전파의 모형화

앞 절에서는 조적식 구조물의 구성방정식을 유도하였으며 외부 하중에 의해 조적식 구조물내에 소성 변형률이 발생하였을 경우, 이를 모형화하는 방법에 대하여 고찰하였다. 본 절에서는 소성 변형률에 의한 균열 발생후 균열의 전파를 모형화하기 위한 방안에 대하여 고려하였으며 특히 Lee 등 (1996) 에서와는 다르게 인장 및 전단균열을 동시에 모형화하여 좀더 현실적인 접근법이 될 수 있도록 하였다.

조적식 구조물내 인장 균열은 각 구성체의 인장응력이 인장강도를 초과하는 경우에 발생한다고 가정하고 인장 균열의 전파는 콘크리트 재료에서 흔히 볼 수 있는 지수형 감소형태를 취하며 본 연구의 경우, 속도 불연속계로 표현할 수 있다. 즉,

$$F^i = \sigma_1^i - f_t^i (e^{-x (\eta g_x^i)^\lambda}) \quad (18)$$

여기서 위첨자 i 는 고려하는 구성체에 따라 벽돌 및 각종 줄눈으로 간주할 수 있고 f_t^i 는 인장강도, x, η, λ 는 소성연화에 따른 재료상수이다. 한편 전단균열에 의한 전파모형은 Lee & Pande (1999)에 따라 다음과 같은 소성 연화법칙을 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tan \phi_m^i &= \tan \phi_r^i - (\tan \phi_r^i - \tan \phi_i^i) \exp \\ &[-C_0 g_x^i (g_x^i + C_1)] \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, 내부마찰각에 대한 소성연화는 초기값 i 및 잔류값 r 과 실제값 m 사이의 관계로 표현되며 C_0 및 C_1 은 재료상수이다.

식 (18) 및 식 (19)는 Mohr-Coulomb 항복함수에 인장

강도 (tension cut-off)를 함께 고려한 형태로 간주할 수 있으며 인장 및 전단측 모두 소성 연화법칙을 적용하였다. 따라서 실제 조적식 구조물의 균열전파 모형을 현실적으로 모사할 수 있을 것으로 판단되며 다음 장에서 이에 대한 수치해석 예를 고려하였다. 한편 실제 조적식 구조물의 거동에 있어서 외부에서 현저한 전단력을 가하지 않는 경우, 일반적으로 인장파괴 양상을 보이므로 간편해석에 있어서는 인장균열만을 고려해도 무방할 것으로 판단된다.

4. 수치해석 예

본 장에서는 앞서 도출한 조적식 구조물의 각종 물성을 매개변수 해석을 통하여 비교·분석하였으며 특히 실제 구조물 해석에 적용될 수 있도록 도표화하였다. 이후, 조적식 벽체의 수치해석 예를 통하여 제한한 모형의 효용성을 검증하였으며 추후 이어질 연구에서 지진 등에 의한 실제 조적식 터널의 안정성 분석 및 보강효과 등에 대하여 고찰할 예정이다.

4.1. 물성 변화에 따른 매개변수 해석

식 (3)의 각종 물성에 대한 매개변수 해석결과는 그림 4에 나타내었다. 이를 위하여 표 1과 같은 대표적인 조적식 구조물의 물성을 가정하였고 줄눈의 노후화로 인한 열화현상을 모형화하기 위하여 줄눈의 탄성계수를 매개변수로 가정하였다.

그림 4에서 횡축은 벽돌과 줄눈의 탄성계수 비, E_b/E_j , 를 나타내며 그림 2의 좌표축을 근거로 다층 및 단층 조적식 구조물의 비등방 물성을 비교해 보면 X 및 Y 방향 물성은 층수에 크게 관계없이 줄눈의 탄성계수가 감소할 수록 현저히 저감되나 복합체의 성질상 Y방향 물성이 더 큰 값을 가진다. 한편 Z방향 물성의 경우, 다층 조적체의

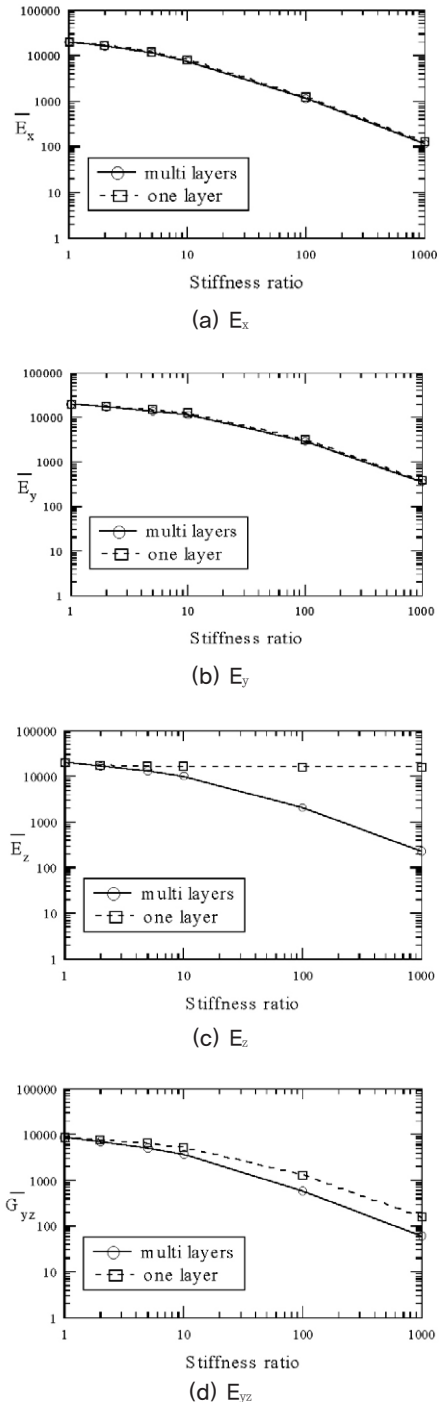


그림 4. 조적식 구조물의 비등방 물성

줄눈이 열화된 경우 등과 같이 탄성계수의 비가 증가하는 경우, 단층 조적체에 비해 현저히 저감되는 것을 알 수 있다. 실제로 벽돌과 줄눈의 탄성계수 비는 약 3정도인 것으로 알려져 있으나, 본 연구와 같이 준공후 80년 정도 경과한 조적체인 경우는 이보다 훨씬 열악한 상황일 것으로 판단된다.

4.2. 조적식 구조물의 수치해석 예

실제 다층 조적식 구조물의 거동을 고찰하기 위하여 그림 2(b)와 같은 단순한 평판형 조적조를 고려하였다. 조적조는 좌우 및 상하 대칭인 형상을 갖고 4번 모두 단층 지지되었으며 균일한 분포하중이 상단에서 작용하는 것으로 가정하였다. 벽돌과 줄눈의 탄성계수비는 3으로 가정하였으며 그 밖의 변수는 표 1의 값을 적용하였고 조적조의 크기는 5.5×2.6×0.1m로 가정하였다.

그림 5에는 평판형 조적조의 분포하중과 중앙점에서의 변위 관계를 도시하였다. 조적조가 단층인 경우와 2층인 경우, 모두 비슷한 양상을 보이고 있으며 이는 고려하는 하중조건이 배면줄눈의 파괴와 크게 관계없음을 의미한다. 그러나 배면줄눈의 특성상 2층 조적조의 경우, 초기 하중-변위곡선의 기울기가 단층인 경우에 비해 감소함을

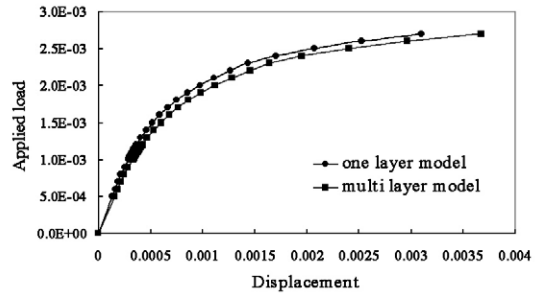


그림 5. 균일한 외부하중을 받는 조적식 판넬의 하중-변위도

알 수 있으며 이를 통해 본 연구에서 제안한 모형의 적정성을 간접적으로 입증할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 재래식 철도터널의 라이닝재로 적용된 바 있는 조적식 구조물의 해석기법에 대하여 기술하였다. 이를 위하여 조적조내 벽돌과 줄눈재를 각각 별개의 구성체로 가정하여 복합체 기본이론을 도입하였으며 특히 다층 조적조의 해석기법에 대하여 논의하였다.

실제로 현장에서 적용가능하도록 복합체의 에너지이론을 근거로 조적조의 비등방 물성을 도표화하였으며 이를 근거로 상용 해석프로그램에 적용하여 조적식 구조물의 안전성을 검토할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 균열의 발생 및 전파모형을 도입하여 조적조의 비탄성 거동을 모형화하였으며 실제 모형 판넬을 고려하여 다층 조적조 구조물의 거동을 예측하였다.

향후에는 본 연구를 기초로 조적식 터널을 위시한 각종 구조물의 내진해석 및 각종 보강방안에 대한 정량적인 효과분석이 시행될 예정이다. 또한 실제 조적조의 물성실험을 통하여 시간경과에 따른 물성변화와 이에 따른 실질적인 구조해석이 가능할 것으로 판단된다.

표 1. 조적식 구조물의 매개변수 해석을 위한 물성 입력값

벽 돌			
크기	W×B×H	mm	210×52×100
탄성계수	E_b	N/mm ²	20,000
포아송비	ν_b	-	0.25
압축강도	$\sigma_{c,b}$	N/mm ²	-20.0
인장강도	$\sigma_{t,b}$	N/mm ²	1.85
줄 눈			
두께	t_{b1}, t_{b2}, t_{c1}	mm	10, 10, 10
탄성계수	E_j	N/mm ²	20~20,000
포아송비	ν_j	-	0.30
압축강도	$\sigma_{c,j}$	N/mm ²	-5.0
인장강도	$\sigma_{t,j}$	N/mm ²	0.32

참고 문헌

1. Ali, S. & Page, A. W. (1988), "Finite element model for masonry subjected to concentrated loads", J. Str. Eng., Vol. 114, pp.1761-1784.
2. Casolo, S. (2000), "Modelling the out-of-plane seismic behaviour of masonry walls by rigid elements", Earth. Eng. Str. Dyn., Vol. 29, pp.1797-1813.
3. Cecchi, A. & Rizzi, N. L. (2001), "Heterogeneous elastic solids: a mixed homogenization rigidification technique", I. J. Solids Str., Vol. 38, pp.29-36.
4. Gambarotta, L. & Lagomarsino, S. (1997a), "Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: The mortar joint model and its applications", Earth. Eng. Str. Dyn., Vol. 26, pp.423-439.
5. Gambarotta, L. & Lagomarsino, S. (1997b), "Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: The continuum model and its applications", Earth. Eng. Str. Dyn., Vol. 26, pp.441-462.
6. Guinea, G. V., Hussein, G., Elices, M. & Planas, J. (2000), "Micromechanical modeling of brick-masonry fracture", Cement & Conc. Res., Vol. 30, pp.731-737.
7. Lee, J. S., Pande, G. N., Middleton, J. & Kralj, B. (1996), "Numerical modelling of brick masonry panels subject to lateral loadings", Comp. & Str., Vol. 61, pp.735-745.
8. Lee, J. S., Pande, G. N. & Kralj, B. (1998), "A comparative study on the approximate analysis of masonry structures", Mat. & Str., Vol. 31, pp.473-479.
9. Lee, J. S. & Pande, G. N. (1999), "A new joint element for the analysis of media having discrete discontinuities", Mech. Coh.-Frict. Mat., Vol. 4, pp.487-504.
10. Lee, J. S., Bang, C. S. & de Buhan, P. (2001), "Application of three-dimensional anisotropic yield function to grout-reinforced geomaterial", I. J. Num. Anal. Meth. Geomech., submitted.
11. Lopez, J., Oller, S. Onate, E. & Lubliner, J. (1999), "A

- homogeneous constitutive model for masonry", I. J. Num. Meth. Eng., Vol. 46, pp.1651-1671.
12. Lotfi, H. R. & Shing, P. B. (1994), "Interface model applied to fracture of masonry structures", J. Str. Eng., Vol. 120, pp.63-80.
13. Lourenco, P. B., Rots, J. G. & Blaauwendraad, J. (1998), "Continuum model for masonry: Parameter estimation and validation", J. Str. Eng., Vol. 124, pp.642-652.
14. Sinha, B. P. (1980), "An ultimate load analysis of laterally load brickwork panels", I. J. masonry Const., Vol. 1, pp.57-61.
15. Sutcliffe, D. J., Yu, H. S. & Page, A. W. (2001), "Lower bound limit analysis of unreinforced masonry shear walls", Comp. & Str., Vol. 79, pp.1295-1312.

부록 I.

식 (3)의 복합체 물성 중 \bar{E}_x 의 구성요소를 나타내면 다음과 같다. 우선 벽돌과 종줄눈의 복합체를 가정하면,

$$\bar{E}_x^{(1)} = \alpha^{(1)} - \zeta^{(1)} \nu_{xz}^{(1)} \tag{I.1}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \nu_{xz}^{(1)} &= \frac{\zeta^{(1)}}{\alpha^{(1)}} \\ \alpha^{(1)} &= \frac{\mu_b E_b}{1 - \nu_b^2} + \frac{\mu_{hj} E_{hj}}{1 - \nu_{hj}^2} \\ \zeta^{(1)} &= \frac{\mu_b \nu_b E_b}{1 - \nu_b^2} + \frac{\mu_{hj} \nu_{hj} E_{hj}}{1 - \nu_{hj}^2} \end{aligned} \tag{I.2}$$

이고 벽돌과 종줄눈의 복합체 (1)과 횡줄눈을 함께 고려한 복합체 (2)에 대하여는

$$\frac{1}{E_x^{(2)}} = \frac{\mu_{bj}}{E_{bj}} + \frac{\mu_1}{E_x^{(1)}} + \lambda_{bj} \left\{ \frac{\nu_{yx}^{(2)}}{E_y^{(2)}} - \frac{\nu_{bj}}{E_{bj}} \right\} +$$

$$\lambda^{(1)} \left\{ \frac{\nu_{yx}^{(2)}}{E_y^{(2)}} - \frac{\nu_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \right\} + \chi_{bj} \left\{ \frac{\nu_{zx}^{(2)}}{E_z^{(2)}} - \frac{\nu_{bj}}{E_{bj}} \right\} + \chi^{(1)} \left\{ \frac{\nu_{zx}^{(2)}}{E_z^{(2)}} - \frac{\nu_{xz}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \right\}$$

(I.3)

와 같다. 여기서,

$$\lambda^{(2)} = \lambda_{bj} + \lambda^{(1)} = \frac{\mu_{bj}\nu_{bj}}{1 - \nu_{bj}} + \frac{\mu_1(\nu_{yx}^{(1)} + \nu_{yz}^{(1)}\nu_{zx}^{(1)})}{1 - \nu_{yz}^{(1)}\nu_{zy}^{(1)}}$$

$$\chi^{(2)} = \chi_{bj} + \chi^{(1)} = \frac{\mu_{bj}\nu_{bj}}{1 - \nu_{bj}} + \frac{\mu_1(\nu_{zx}^{(1)} + \nu_{yx}^{(1)}\nu_{zy}^{(1)})}{1 - \nu_{yz}^{(1)}\nu_{zy}^{(1)}}$$

(I.4)

이며 최종적으로 배면줄눈을 포함한 전체 조적식 구조물의 X-방향 탄성계수는

$$\bar{E}_x = \frac{\bar{\alpha}\bar{\beta} - \bar{\zeta}^2}{\bar{\beta}} \quad (I.5)$$

와 같이 표현되며 여기서,

$$\bar{\alpha} = \frac{\mu_{cj}E_{cj}}{1 - \nu_{cj}^2} + \frac{\mu^{(2)}E_x^{(2)}}{1 - \nu_{xy}^{(2)}\nu_{yx}^{(2)}} \quad (I.6)$$

$$\bar{\beta} = \frac{\mu_{cj}E_{cj}}{1 - \nu_{cj}^2} + \frac{\mu^{(2)}E_y^{(2)}}{1 - \nu_{xy}^{(2)}\nu_{yx}^{(2)}} \quad (I.6)$$

$$\bar{\zeta} = \frac{\mu_{cj}\nu_{cj}E_{cj}}{1 - \nu_{cj}^2} + \frac{\mu^{(2)}\nu_{yx}^{(2)}E_x^{(2)}}{1 - \nu_{xy}^{(2)}\nu_{yx}^{(2)}} \quad (I.6)$$

와 같다.