

손상과 크리프의 상호작용에 의한 조적조 기둥의 복합거동

김정중¹

경남대학교 건축학부 조교수¹

Composite Action in Masonry Columns Due to Damage and Creep Interaction

Kim, Jung Joong¹

¹Assistant Professor, School of Architecture, Kyungnam University, Changwon-si, Korea

ABSTRACT

Abstract: Since the collapse of historical masonry structures in Europe in the late 1990's, the interests in understanding the long-term effect of masonry under sustained compressive stresses have increased. That requires combining the significance of time-dependent effects of creep with the effect of damage due to overstress to realize the evolution of cracks and then failure in masonry. Meanwhile, composite analysis of masonry columns was proven effective for realizing ultimate strength capacity of masonry column. In this study, a simplified mechanical model with step-by-step in time analysis was proposed to incorporate the interaction of damage and creep to estimate the maximum stress occurred in masonry. It was examined that the interaction of creep and damage in masonry can accelerate the failure of masonry.

Key Words: composite action, creep, damage, strength limit, masonry

1. 서론

구조적 성질이 다른 재료로 만들어진 구조부재들로 구성된 복합 구조물에 작용하는 하중은 구조부재의 상대적인 강성과 복합 구조물의 지점조건에 따라 각각의 구조부재에 분배 된다 (Leczner 1969, Kim and Kim 2013). 이러한 복합 구조물에 나타나는 구조적 거동을 복합거동(Composite action)이라 한다.

크리프는 지속적인 상재하중에 의해 재료에 발생하는 시간에 따른 추가적인 변형으로 (Shrive 1988), 일반적으로 구조물의 장기치짐과 같은 사용성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Shrive and England 1981). 그렇지만, 지점이 구속되어 있고, 크리프의

양에 차이가 있는 재료로 만들어진 구조부재들로 이루어진 복합구조물의 경우, 구조체의 변형률 적합 조건을 만족시키기 위하여, 복합 구조물의 내부에서 구조부재 간 작용하중의 재분배가 발생할 것이다 (Reda Taha and Shrive 2006). 이러한 구조부재 간 작용하중의 재분배는 부재에 발생하는 응력의 변화를 유발하여, 복합 구조물의 사용 중 재료의 강도한계를 넘는 응력을 발생시킬 수도 있을 것이다

외부에 조적조를 쌓고, 내부에 그라우트 몰탈을 채운 조적조 기둥의 경우, 상재하중은 조적조와 내부 그라우트 몰탈의 상대적인 강성비에 의해 조적조와 그라우트 몰탈에 분배될 것이다. 외부 조적조 뿐만 아니라 내부 그라우트 몰탈도 다양한 화학적, 물리적 요인에 의해 손상을 받을 것이고 (Valluzzi et al. 2005), 이로 인해 외부 조적조와 내부 그라우

주요어: 복합거동, 크리프, 손상, 강도한계, 조적조

Corresponding author: Kim, Jung Joong

School of Architecture, Kyungnam University, 7 Kyungnamdaehak-ro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 631-701, Korea.

Tel: +82-55-249-6421, Fax: +82-505-999-2164, E-mail: jungkim@kyungnam.ac.kr

투고일: 2014년 5월 14일 / 수정일: 2014년 6월 30일 / 게재확정일: 2014년 6월 30일

트 몰탈의 강성의 저하가 발생할 것이다. 이러한 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈의 강성 저하는 상호간에 상대적인 강성비의 변화를 야기하고, 결과적으로 상재하중의 재분배가 이루어질 것이다 (Choi et al. 2007, Kim et al 2012).

본 연구에서는 외부 조적조와 내부 그라우트몰탈로 이루어진 축하중을 받는 복합 조적조 기둥에 대하여 시간에 따른 크리프와 손상에 의한 기둥의 복합거동을 고려하는 방법을 제시할 것이다. 제안된 방법을 이용하여 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈에서의 시간에 따른 응력의 변화를 고찰할 것이다. 상재 축하중을 받는 조적조 복합기둥에 있어서 크리프가 추가적인 변형만을 일으키는 것이 아니라 사용 중 크리프에 의해 기둥이 파괴 한계상태에 도달할 수 있음을 보일 것이다.

2. 방법

2.1 복합거동

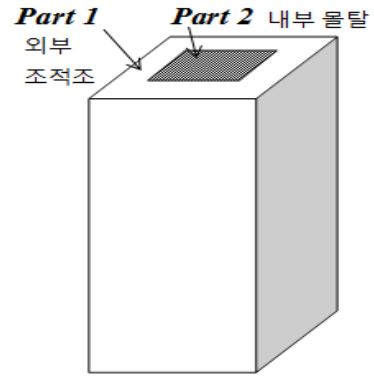
Fig. 1(a)와 같이 다른 구조적 성질을 가진 두 부분 Part 1과 Part 2로 이루어진 복합 기둥에 축 방향 하중 Q 가 작용할 때의 복합거동은, Fig. 1(b)와 같은 평행한 두 스프링 구조모형을 사용하여 해석할 수 있다. 시간 t 에서의 힘의 평형은 다음 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t) \quad (1)$$

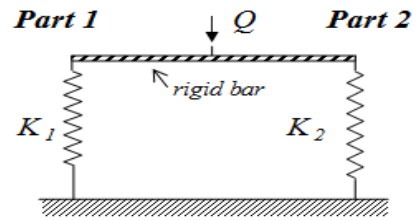
식에서 $Q_1(t)$ 와 $Q_2(t)$ 는 시간 t 에서 Part 1과 Part 2에 작용하는 하중이다. 두 부분의 다른 크리프 양과 손상에 의한 시간에 따른 강성도의 변화를 고려할 경우, 시간 t 에서의 두 부분의 변형 적합 조건은 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_1(t)/K_1(t) + \Delta_{c1}(t) \\ = Q_2(t)/K_2(t) + \Delta_{c2}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

식에서 $K_1(t)$ 와 $K_2(t)$ 는 시간 t 에서 Part 1과 Part 2의 강성도이다. $\Delta_{c1}(t)$ 와 $\Delta_{c2}(t)$ 는 시간 t 까지 Part 1과 Part 2에 누적된 크리프에 의한 변형량이다. 식 (1)과 (2)를 풀어 시간 t 에서의 복합 기둥 각 부분의 응력을 결정할 수 있다.



(a) Masonry column



(b) Composite modeling

Fig. 1 Composite Action Modeling

2.2 크리프 모형

외부 조적조와 내부 몰탈의 크리프 변형률을 계산하기 위하여 식 (3)의 켈빈(Kelvin) 크리프 모형을 사용하였다 (Neville et al 1983, Young et al 1998).

$$\epsilon_c(t) = \frac{\sigma(t)\phi}{E(t)}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

식에서 t 는 시간이고, $\sigma(t)$ 는 시간 t 에서의 작용응력이다. $E(t)$ 는 손상을 고려한 시간 t 에서의 탄성계수이다. ϕ 는 재료의 크리프 계수이다. τ 는 총 크리프의 63%가 발생하는 시간이다. 만약 외부 손상이 없다면, 시간 t 에서의 탄성계수 $E(t)$ 는 초기 탄성계수와 동일한 것으로 가정한다.

2.3 손상모형

본 연구에서는 특정시점 이후 시간에 따라 연속적으로 손상이 발생하는 손상모형을 사용하였다 (Lemaitre and Chaboche 1990). 손상에 의하여 식 (4)와 같이 재료의 탄성계수가 감소하는 모형을 고려하였다 (Reda Taha and Shrive 1981).

$$E(t) = [1 - D(t)]E(t_0) \quad (4)$$

$$D(t) = \beta t^{\beta-1} \quad (5)$$

$$\beta = 1 + \frac{\ln(D_i/D_{max})}{\ln(T_i/T_{max})} \quad (6)$$

식에서 $D(t)$ 는 시간 t 에서의 손상정도이다. 손상이 없을 때 0이고 완전 손상의 경우 1.0이다. D_i 은 초기 손상시작 시간 T_i 에서의 초기 손상정도, D_{max} 는 최대 손상 시간 T_{max} 에서의 최대 손상정도이다.

3. 사례연구

사례연구를 위한 상재 축하중 1500 kN을 받는 조적조 복합기둥의 외부 조적조와 내부몰탈의 면적과 재료적 성질을 Table 1에 정리하였다. 외부 조적조와 내부 몰탈의 다양한 크리프 계수와 손상 조합을 고려한 총 16개의 경우에 대하여 2000일 동안 외부 조적조와 내부 몰탈에 발생하는 응력의 변화를 관찰하였다. Table 2에 16개의 경우의 조합을 정리하였다. 크리프 계수 ϕ 와 τ 의 4가지 조합에 대하여, 손상이 없는 경우, 외부 조적조만 손상이 되는 경우, 내부 몰탈만 손상이 되는 경우, 외부 조적조와 내부몰탈이 모두 손상이 되는 경우의 총 16개의 사례연구를 수행하였다. 손상은 식 (6)의 D_i , T_i , D_{max} , T_{max} 를 외부 조적조에 대하여 각각 0.01, 400일, 0.6, 2000일로 고려하였고, 내부몰탈에 대하여 각각 0.01, 400일, 0.3, 2000일로 고려하였다.

Table 1. Mechanical Properties of Masonry Column for Case Study

Materials	Properties			
	Poisson's Ratio	Modulus(GPa)	Strength(MPa)	Area (m ²)
Brickwork	0.2	15	18	0.06
Grout	0.3	24	30	0.04

4. 결과 및 토의

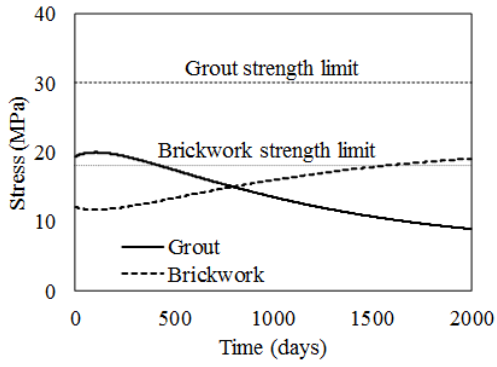
먼저 손상을 고려하지 않은 4가지 크리프 계수 조합에 대하여 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈에서의 응력의 변화를 Fig 2에 보였다. Fig. 2의 (a)와 (b)의 경우는 내부 그라우트 몰탈의 총 크리프 양 ($\phi = 6$)이 외부 조적조의 총 크리프 양 ($\phi = 3$)의 두배가 되는 경우들로, Fig. 2 (a)는 외부 조적조의 크리프 속도 ($\tau = 400$ 일)가 더 빠른 경우이고 Fig. 2 (b)는 그라우트 몰탈의 크리프 속도($\tau = 400$ 일)가 더 빠른 경우이다. 두 경우 모두 외부 조적조 내의 응력이 강도한계인 18 MPa를 초과함을 볼 수 있는데, Case 1-1의 경우 1547일에 초과하는 반면, Case 1-2는 상대적으로 빠른 194일에 강도한계를 초과함을 볼 수 있다. Fig. 2의 (c)와 (d)는 내부 그라우트 몰탈의 총 크리프 양이 외부 조적조

Table 2. Combination of Creep Coefficient, Retardation Time and Damage

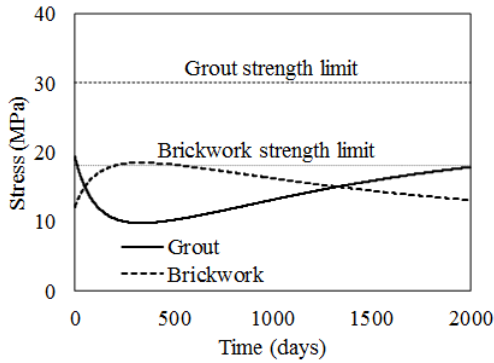
Cases	Brickwork			Grout		
	ϕ	τ (day)	D	ϕ	τ (day)	D
Case 1-1	3	400	No	6	1000	No
Case 1-2	3	1000	No	6	400	No
Case 1-3	6	400	No	3	1000	No
Case 1-4	6	1000	No	3	400	No
Case 2-1	3	400	Yes	6	1000	No
Case 2-2	3	1000	Yes	6	400	No
Case 2-3	6	400	Yes	3	1000	No
Case 2-4	6	1000	Yes	3	400	No
Case 3-1	3	400	No	6	1000	Yes
Case 3-2	3	1000	No	6	400	Yes
Case 3-3	6	400	No	3	1000	Yes
Case 3-4	6	1000	No	3	400	Yes
Case 4-1	3	400	Yes	6	1000	Yes
Case 4-2	3	1000	Yes	6	400	Yes
Case 4-3	6	400	Yes	3	1000	Yes
Case 4-4	6	1000	Yes	3	400	Yes

의 총 크리프 양의 반이 되는 경우들이다. 두 경우 모두 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈의 응력이 강도한계를 초과하지 않으나, Case 1-4의 경우 내부 그라우트 몰탈의 응력이 130일 이후 지속적으로 증가하고 있으며, 최종 해석시간인 2000일에서는 29.5 MPa로 그라우트 몰탈의 강도한계인 30 MPa에 매우 근접하고 있다.

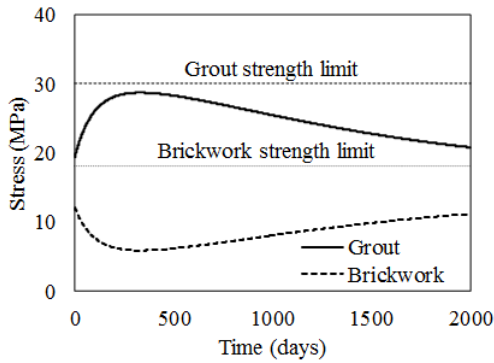
다음은 조적조 기둥의 손상을 고려하는 일반적인 경우로, 외부 조적조의 손상만을 고려한 4가지 크리프 계수 조합에 대하여 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈에서의 응력의 변화를 Fig 3에 보였다. 손상을 고려하지 않은 Fig. 2의 경우들과 비교해 보면, 초기에는 유사한 응력의 변화를 보인다. 하지만, 외부 조적조의 손상이 증가함에 따라 약 1500일 이후부터 내부 그라우트 몰탈의 응력이 상승하고, 외부 조적조의 응력이 감소함을 볼 수 있다. 이는 외부 조적조의 강성이 저하되면서, 외부 조적조가 받고 있던 하중이 내부 그라우트 몰탈로 재분배되기 때문이다. Fig. 3 (b)의 경우, 외부 조적조의 응력이 194일에 강도한계를 초과하고 Fig. 3의 (d)의 경우, 1663일에 내부 그라우트 몰탈의 강도한계를 초과한다. Fig. 3 (a)와 (c)의 경우는 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈의 응력이 강도한계를 초과하지 않았다.



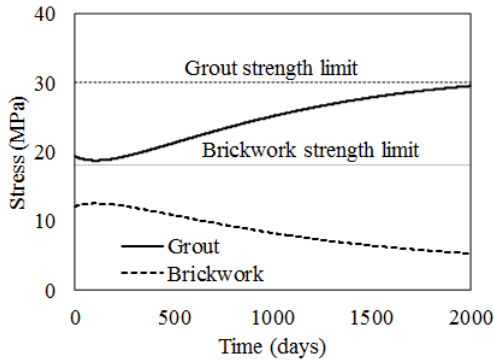
(a) Case 1-1



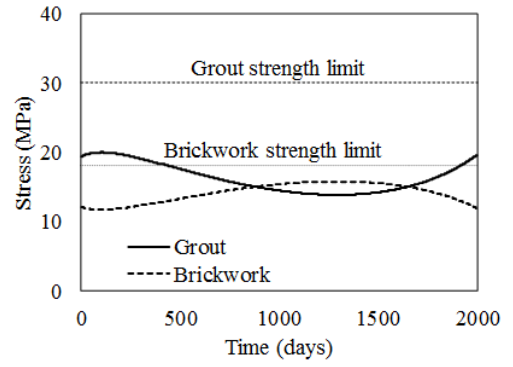
(b) Case 1-2



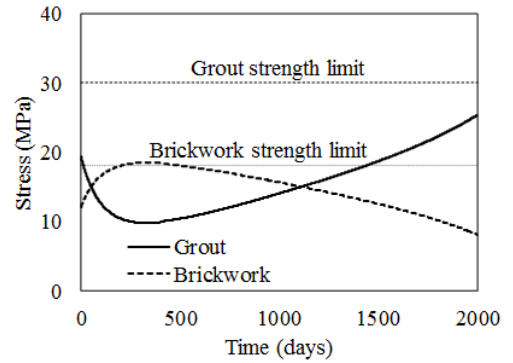
(c) Case 1-3



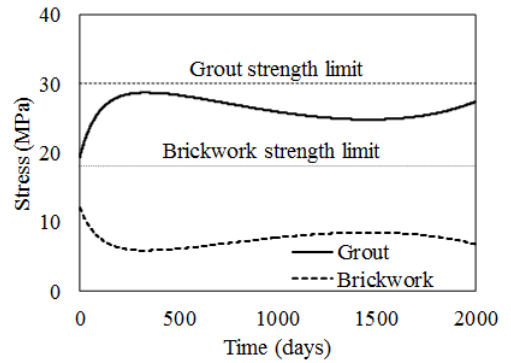
(d) Case 1-4



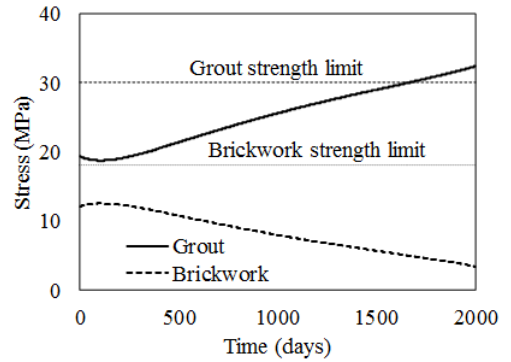
(a) Case 2-1



(b) Case 2-2



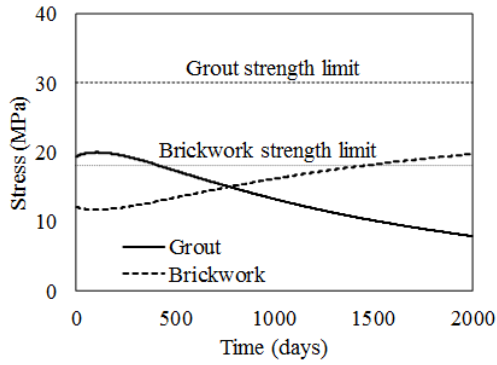
(c) Case 2-3



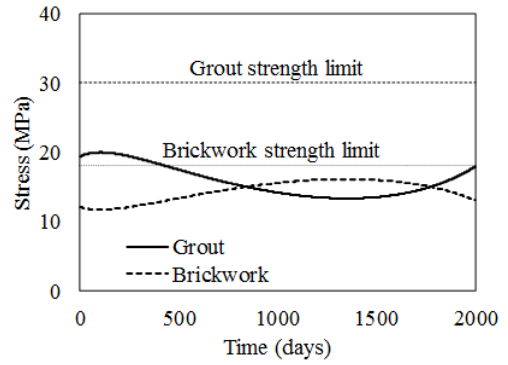
(d) Case 2-4

Fig. 2 Stress Evolution in Masonry Columns for Different Creep Coefficients and Retardation Times of Brickworks and Grout Mortar Without Damage in both Brickworks and Grout Mortar

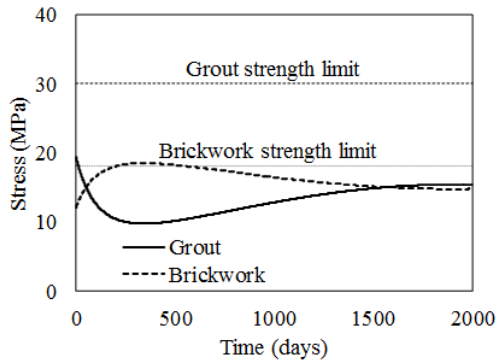
Fig. 3 Stress Evolution in Masonry Columns for Different Creep Coefficients and Retardation Times of Brickworks and Grout Mortar with Damage in Brickworks



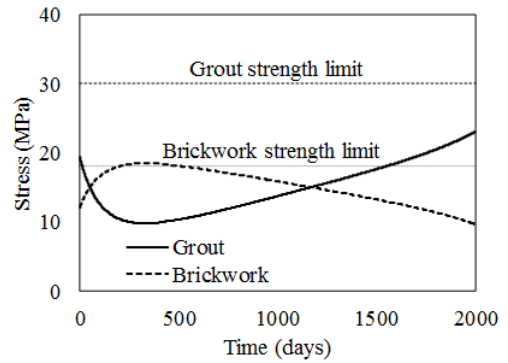
(a) Case 3-1



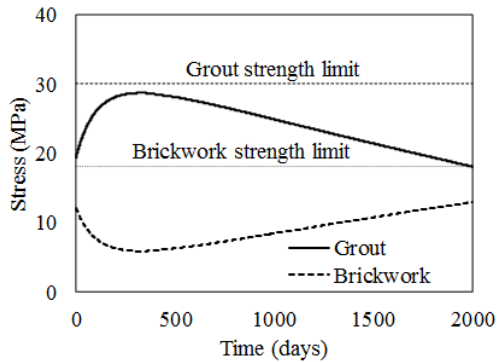
(a) Case 4-1



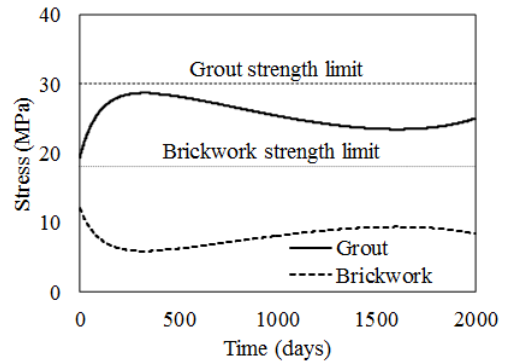
(b) Case 3-2



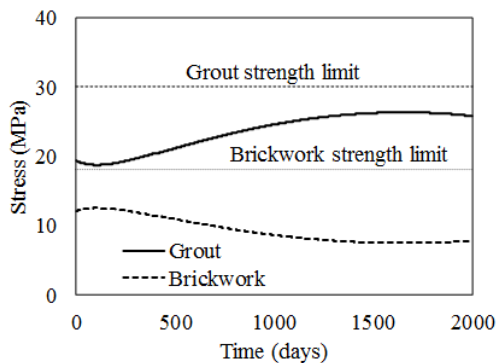
(b) Case 4-2



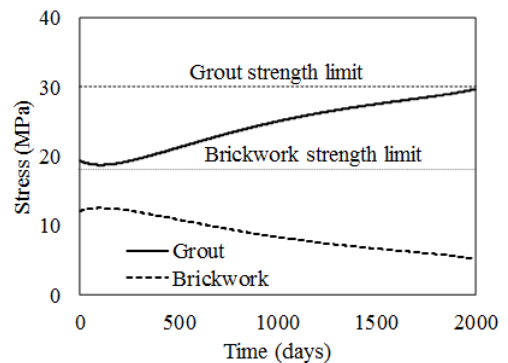
(c) Case 3-3



(c) Case 4-3



(d) Case 3-4



(d) Case 4-4

Fig. 4 Stress Evolution in Masonry Columns for Different Creep Coefficients and Retardation Times of Brickworks and Grout Mortar with Damage in Grout

Fig. 5 Stress Evolution in Masonry Columns for Different Creep Coefficients and Retardation Times of Brickworks and Grout Mortar with Damage in both Grout and Brickwork

일반적으로 내부 그라우트 몰탈이 손상되는 경우는 드물기 때문에, 내부 그라우트 몰탈의 최대 손상도는 외부 조적조의 최대 손상도 60%의 절반인 30%로 설정하였다. 내부 그라우트 몰탈만의 손상을 고려한 4가지 크리프 계수 조합에 대하여 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈에서의 응력의 변화를 Fig 4에 보였다. 손상을 고려하지 않은 Fig. 2의 경우들과 비교해 보면, 초기에는 유사한 응력의 변화를 보이지만, 내부 그라우트 몰탈의 손상으로 인하여 약 1500일 이후부터 내부 그라우트 몰탈의 응력의 상승이 둔화됨을 볼 수 있다. Fig. 4 (b)의 경우, 외부 조적조의 응력이 194일에 강도한계인 18 MPa를 초과함을 볼 수 있다. 나머지 경우는 모두 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈의 응력이 강도한계를 초과하지 않았다.

마지막으로, 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈의 손상을 모두 고려한 4가지 크리프 계수 조합에 대하여 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈에서의 응력의 변화를 Fig 5에 보였다. 4가지 경우 모두, 외부 조적조만의 손상을 고려한 Fig. 3의 경우들과 매우 유사한 응력의 변화를 보인다. Fig. 3의 경우들에 비하여 내부 그라우트 몰탈의 손상을 추가로 고려했기 때문에 약 1500일 이후부터 내부 그라우트 몰탈의 응력의 상승이 둔화됨을 볼 수 있다. Fig. 5 (b)의 경우, 외부 조적조의 응력이 194일에 강도한계인 18 MPa를 초과함을 볼 수 있고, Fig. 4 (d)의 경우 내부 몰탈의 응력이 2000일에서 강도한계인 30MPa에 도달함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 지속적인 상재 축하중을 받는 복합 조적조 기둥에 대하여 시간에 따른 크리프와 손상에 의한 기둥의 복합거동을 고려하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 사용하여 외부하중 크기의 변화 없이, 기둥의 외부 조적조와 내부 그라우트 몰탈에서 시간에 따라 응력상태가 변화함을 확인하였다. 사용 중 크리프와 손상에 의해 기둥이 파괴 한계상태에 도달할 수 있음을 확인하였다.

제안된 방법은 기둥에 작용하는 축 하중에 대하여 축 방향의 변형만을 고려하였기 때문에, 프아송 효과에 의한 면외 방향의 응력을 고려하지 않고 있다. 향후 유한요소해석을 이용한 3차원 모형을 이용하여, 면외 응력에 의한 조적조의 균열과 좌굴, 안정성에 관한 연구를 수행할 예정이다.

References

- Choi, K. K., Lissel, S. L., and Reda Taha, M. M. (2007), "Rheological Modelling of Masonry Creep" *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 11, pp. 1506-1517.
- Kim, J. J., Fan, T., Reda Taha, M. M., and Shrive, N. G. (2012), "The Effect of Damage and Creep Interaction on the Behaviour of masonry Columns Including Interface Debonding and Cracking", *Materials and Structures*, Vol. 45, pp. 15-29.
- Kim, J. J., Kim, S.-E. (2013) "Design Optimization of Safety Barrier Consisting of Steel Rail and CFRP Post", *Korean Soc. Adv. Comp. Struc.* Vol. 4, No. 2, pp. 25-30, June 2013
- Lenzner, D. (1969), "Creep in Model Brickwork" *Proceedings of Designing Engineering and Construction with Masonry Products*, Johnston, F.B., Ed. Houston, U.S.A. pp. 58-67.
- Lemaitre, J., Chaboche, J.-L. (1990), "Mechanics of Solid Materials", Cambridge University Press.
- Neville, A. M., Dilger, W. H., and Brooks, J. J. (1983), "Creep of Plain and Structural Concrete" First Edition, Construction Press, U.K.
- Reda Taha, M. M. and Shrive, N. G. (2006), "A Model of Damage and Creep Interaction in a Quasi-brittle Composite Material under Axial Loading" *Journal of Mechanics*, Vol. 22, No. 4.
- Shrive, N. G. (1988), "Effects of Time-dependent Movements in Composite and Post-tensioned Masonry", *Masonry International*, 2(1): pp. 25-29.
- Shrive, N. G. and England, G. L. (1981), "Elastic, Creep and Shrinkage Behaviour of Masonry" *International Journal of Masonry Construction*, Vol. 1, No. 3.
- Valluzzi, M. R., Binda, L., and Modena, C. (2005), "Mechanical Behaviour of Historic Masonry Structures Strengthened by Bed Joints Structural Repointing" *Construction and Building Materials*, 19.
- Young, F. J., Mindess, S., Gray, R. J., and Bentur, A. (1998), "The Science and Technology of Civil Engineering Materials" Prentice Hall, NJ, U.S.A.