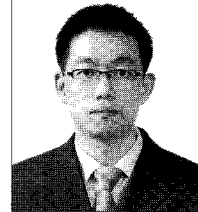


# 미국의 조적구조 연구 동향

## Current Status of Masonry Research in United States



조성우\*

\* 포스코건설 기술연구소 선임연구원

### 1. 서론

조적조는 우리나라 뿐만 아니라 세계 각국에서 가장 흔히 볼 수 있는 주거용 및 상업용 저층 건축이다. 따라서 유럽이나 일본 그리고 미국과 같은 선진국에서는 이러한 조적 건물을 공학적으로 설계/건설하기 위하여 많은 연구를 수행해 오고 있다. 하지만, 우리나라에서는 다른 나라와 마찬가지로 조적 건물이 널리 퍼져 있음에도 불구하고 아직 조적구조에 대한 연구 및 공학적 설계/건설이 선진국에 비해 미비하다. 특히나 현대에 들어서는 조적을 저렴한 건물 외장재료만 여기고 있는 실정이다.

조적은 경제적이면서도 내구성이나 내화성능이 뛰어날 뿐만 아니라 단열효과도 뛰어나다. 특히나 최근 들어 화제가 되고 있는 친환경적인 소재이며, 최종 건축물은 외관에 있어서도 자연과 조화를 잘 이루는 자연스러운 건축이다. 용도에 있어서도 주거 및 상업 건축 나아가서는 소규모 교량에까지 쉽게 그리고 널리 이용할 수 있음을 감안할 때, 조적에 대한 지식 및 정보를 전달할 전문가나 강의 그리고 연구모임이 부족한 국내 현실은 구조 전문가 뿐만 아니라 건축가들에게도 안타까운 상황이다. 이에 따라 아름다운 미국 조적 건축물의 실례 및 최근에 진행되었거나 진행되고 있는 조적 연구과제를 간단히 소개함으로써 국내에서도 조적조에 대한 관심을 환기시키고자 한다.

### 2. 최근 미국 조적 건축물들

첫번째는 워싱턴주 시애틀 외곽에 있는 뷰리언 시청사이다. Ruffcom Mott Hinthorne Stine사가 설계한 이 청사는 시 도서관도 겸하고 있는 3층 높이의 조적 건축물로 면적은 약 5,400 평방미터이다. 2009년 6월에 개관한 이 청사는 1층과 2층은 도서관으로 사용되고 3층은 시청으로 이용되고 있다. 유리와 금속재질이 조적 구조에 자연스럽게 녹아들어 현대적인 느낌을 주면서도 자연적인 모습을 벗어나지 않는 아름다운 건축물이다.



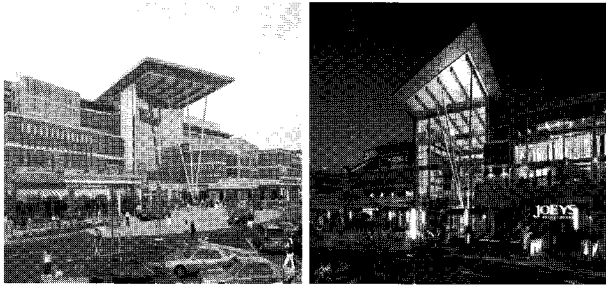
1) 외부 전경 1

2) 외부 전경 2

그림 1 워싱턴주 뷰리언 시청사

두번째는 워싱턴주 투켄라시에 있는 웨스트필드 사우스 센터 쇼핑몰의 사우스관이다. Westfield Design사가 설계한 이 사우스관은 약 37,000 평방미터로 2008년 7월에 개관하

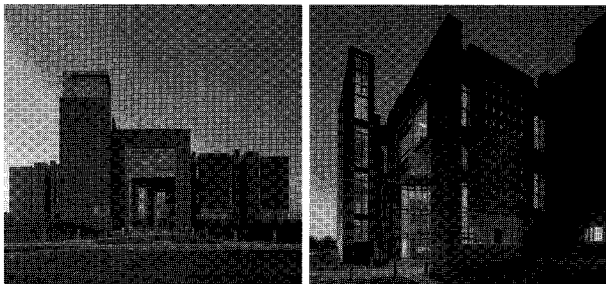
였다. 이 건물은 서울역사와 같은 규모의 건물도 조적을 이용하여 아름답게 표현할 수 있음을 보여준다. 오래된 유적 건물이 많이 존재하는 우리 나라에서 이러한 조적 건물을 잘 이용한다면 과거와 현재의 조화를 자연스럽게 이루어 낼 수 있다.



1) 외부 전경 1                      2) 외부 전경 2

그림 2 워싱턴주 웨스트필드 사우스센터 사우스관

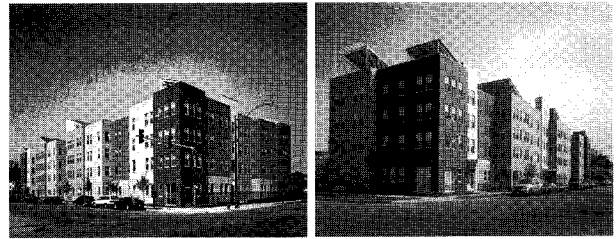
세번째는 일리노이주 레이크 카운티에 위치한 대학센터이다. Legat Architects사가 설계하고 2005년에 완공된 이 대학센터는 약 8500 평방미터로, 육면체 매스들을 조합한 기하학적인 이미지를 조적을 이용하여 현대적으로 잘 표현한 건축물이다. 이 건물은 벽돌을 단순한 치장재가 아니라 건물군 전체의 육체 모양과 어울리게 사용함으로써 기하학적인 조화를 잘 이루어낸다.



1) 외부 전경 1                      2) 외부 전경 2

그림 3 일리노이주 레이크 카운티 대학 센터

마지막으로 보여지는 건물은 일리노이주 시카고에 위치하고 있는 소형 아파트이다. Harley Ellis Devereaux사가 설계하고 2007년에 완공된 이 주거건물은 약 6100 평방미터의 4층 건물로 51개 가구에 주거를 제공한다. 이 아파트는 단순해질 수 있는 아파트 외벽을 벽돌의 다양한 색상의 이용해 지루하지 않게 표현하였다. 최근의 벽돌 제조 기술은 이러한 외벽이 수십년이 아닌 수백년이 지나도 그 색상을 유지할 가능하게 한다.



1) 외부 전경 1                      2) 외부 전경 2

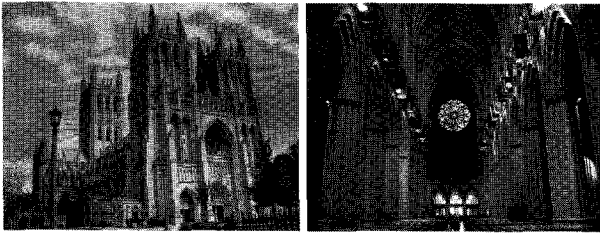
그림 4 일리노이주 시카고 소형 아파트

### 3. 비보강 조적구조를 유한요소 해석 모델의 확률적 보정 (Atamturktur와 Boothby, Penn State University)

대부분의 역사적인 건축물은 비보강 조적으로 이루어져 있다. 이러한 조적 건축물의 관리 및 보강을 위해 비보강 조적조에 대한 구조적인 연구가 다양하게 수행되어 오고 있고, 근래에 들어서는 유한요소 해석의 적용이 활발해지고 있다. 실질적으로, 복잡하게 이루어진 역사적인 조적 건축물들의 경우 현대 최고의 엔지니어들도 직관이나 경험만으로 구조공학자로서의 역할을 해내는 데에는 그 한계가 분명하다. 따라서, 뛰어난 컴퓨터 성능의 발전을 이용하여 복잡한 비보강 조적조의 구조를 분석하고자 유한요소 해석을 적용하는 것은 당연한 수순이다.

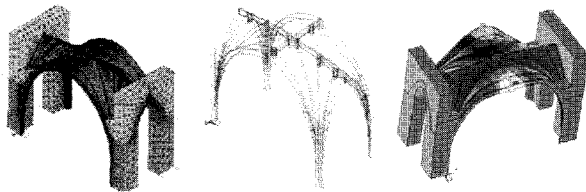
비보강 조적조에서 유한요소 해석의 성공여부는 크게 두 가지 요소에 달려 있다고 볼 수 있다. 하나는 조적 재료의 특징을 나타내는 재료값이고 나머지는 반력조건의 설정이다. 구조 공학자들은 이러한 변수값들을(재료값과 반력조건) 명확하게 알 수 없기 때문에 해석 모델에서 불확실성은 불가피하다. 그리하여 이 연구에서는 그림 5에 보여진 워싱턴 국립 성당 아치 천장들의 모델링을 통하여 불확실한 변수값들을 확률적인 방법으로 보정하고자 하였다. 연구의 주된 목적은 실제 건축물과 정확하게 일치하는 모델을 구축하는 것이 아니라 모델링에 있어서 불확실성의 원인을 좀 더 이해하고 실제 측정값들과 확률적으로 일관되는 예측 모델을 만드는 것이었다. 이를 위해 현장 진동 측정과 해석 시뮬레이션이 확률적 관점의 틀 안에서 수행되어 졌다.

유한요소 모델의 보정은 반복적인 유한요소 해석 결과와 현장 측정의 비교를 통해 이루어졌다. 모델 보정에 있어서 주된 비교 요소는 구조물 내에서 질량과 강성의 분포에 관한 중요한 정보를 제공하고 구조물의 동적 특성을 나타내는 고유 진동수와 진동 모드 형상을 결정하는 모드 변수였다. 유한요소 해석에서는 구조물의 질량과 강성의 분포를 나타내는 3차원 해석 모델을 작성한 뒤 고유치 해석을 통해 모드 변수값들을 계산하였고, 현장 측정에서는 FRP



1) 외부 전경 2) 내부 전경

그림 5 워싱턴 국립 성당



1) 모델 1 2) 모델 2 3) 모델 3

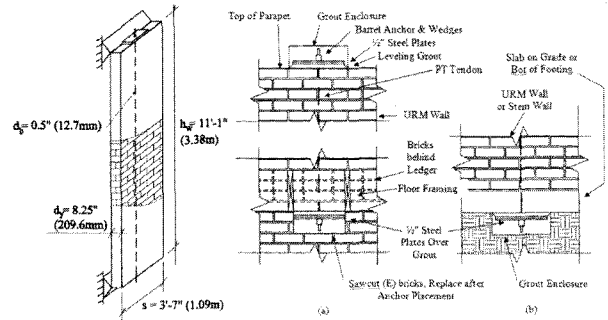
그림 6 워싱턴 국립 성당 내부 아치들의 유한요소 모델

(Frequency Response Functions)를 통하여 상응하는 모드 변수값들을 구함으로써 성공적으로 연구를 수행하였다. 특히 Atamturktur는 워싱턴 국립 성당뿐만 아니라 다른 역사적인 조적 건축물들에도 유한요소 해석을 확실적인 방법론과 통합 적용하여 왕성한 연구활동을 수행해 오고 있다.

#### 4. 포스트 텐서닝으로 후보강된 비보강 조적조의 면외(out-of-plane) 내진 성능 (Lazzarini, Laursen과 McDaniel, California Polytechnic State University)

앞의 연구가 복잡한 비보강 조적 건물의 해석 모델을 통해 구조적 성능 및 상태를 평가하고자 하는 것이라면 이번 연구는 포스트 텐서닝을 통한 비보강 조적 건물의 보강에 관한 것이다. 비보강 조적조는 일반적으로 지진하중에 대해 취약하다고 알려져 있다. 따라서 지진 발생시 이미 지어진 비보강 조적 건축물들의 면외 취성 붕괴를 막기 위해서는 보강이 필요하다. 이 연구는 이러한 후보강(건설 후의 보강)의 한 방법으로 비접착(unoboded) 포스트 텐서닝을 제시하였다.

구체적인 방법은 비보강 조적벽에 일정한 간격으로 강선을 넣기 위한 보어링(지름 2.5cm) 작업을 한 뒤 강선에 비접착 포스트 텐션을 가함으로써 강도를 높일뿐 아니라 연성을 확보하게 하는 것이다. 그림 7과 같은 조적벽 실험체를 제작하여 면외 주기 하중을 정적으로 가하는 방식으로 실험이 진행되었다. 다음 그림은 강선 장착에 관한 세부 사항을 보여준다. 1.3cm 강판을 강선을 장착시키기 위하여 사용하였다.



1) 실험체 2) 강선 장착 세부

그림 7 포스트 텐서닝을 이용한 비보강 조적조의 후보강

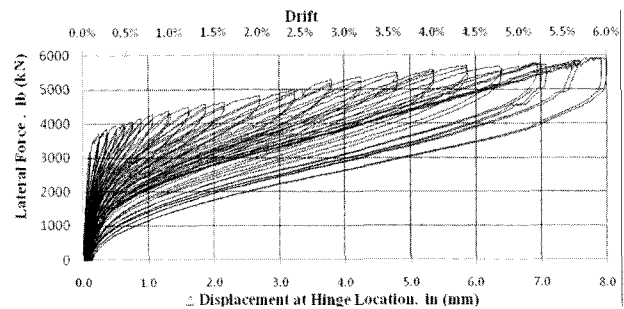


그림 8 포스트 텐서닝을 이용한 후보강된 비보강 조적조의 실험결과

강선의 보강으로 휨저항을 현저히 증가하였고, 붕괴없이 커다란 면외 변형이 일어날 수 있었다. 강선이 계속 탄성 범위에 있었기 때문에 그림 8에 나타난 바와 같이 면외 하중 제거시 조적벽 실험체는 거의 원래 변위로 복귀하였다. 이 연구는 지진 지역에서 역사적인 조적 건축물의 보강에 대한 한 방법을 제시해 준다.

#### 5. 끼움 조적벽이 있는 철근 콘크리트의 내진 성능 (Shing 외 8인, University of California, San Diego 외 2개 대학)

20세기 들어 철근 콘크리트의 도입 이후 끼움 조적벽이 있는 철근 콘크리트도 세계적으로 널리 지어져 왔다. 하지만 대부분의 나라에서 끼움 조적벽은 그 구조적 역할이 무시된 채로 설계되어져 왔다. 하지만 이는 지진 하중에서 항상 보수적인 결과를 산출하는 접근 방법이 아니므로 이 연구는 실험 및 해석적인 접근을 통하여 끼움 조적벽의 구조적 역할을 탐구하였다. 실제로 끼움 조적벽이 있는 철근 콘크리트 골조의 경우 주 파괴 모드는 끼움 조적벽의 균열 및 파쇄 그리고 콘크리트 기둥의 전단 파괴 등으로 끼움벽이 없는 경우와 판이하다.

실험적 연구는 캘리포니아 샌디에고 대학의 진동대를 이용해 이루어졌으며, 해석적 연구는 University of California, Berkeley에서 개발한 개방형 소프트웨어 OpenSees를 이용하여 수행되었다. 이 연구는 내진 연구 결과가 설계에 적용되지 않은 비연성 철근 콘크리트 골조를 주 대상으로 삼았다.

먼저 그림 9와 같은 단층 높이 벽체를 정적 순환 하중을 통해 실험하고 그 데이터를 이용해 적절한 유한요소 해석 모델을 수립하였다.

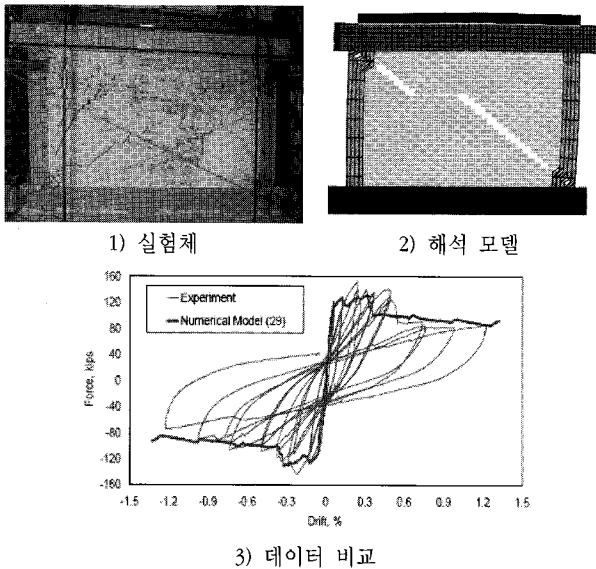


그림 9 끼움 조적벽이 있는 철근 콘크리트의 단층 실험체, 해석 모델 및 데이터 비교

단층 높이 벽체 실험을 바탕으로 그림 10과 같이 2/3 스케일로 3층 높이 실험체를 진동대 위에서 실험하고 이의 해석 모델을 작성하였다. 이를 통해 이들은 끼움 조적벽의 구조적 역할을 파악하는데 상당한 진전을 보여주었다. 그리고 더 나아가서는 이러한 끼움 조적벽이 있는 비연성 철근 콘크리트의 내진 성능을 향상시키기 위한 일환으로 GFRP의 효과 또한 연구하였다.

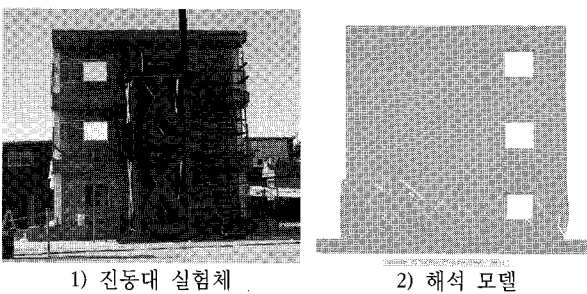


그림 10 끼움 조적벽이 있는 철근 콘크리트의 진동대 실험체 및 해석 모델

## 6. 조적 구조의 성능 기반 내진 설계 (Klingner 외 8인, University of Texas at Austin 외 3개 대학)

앞의 연구들이 이미 지어진 건물들을 중심으로 수행되었다면 새로 지어지는 조적에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. “조적 건물의 성능기반 내진 설계”라는 연구 과제에 2006년 10월부터 2009년 9월까지 미국 National Science Foundation (NSF) 산하 Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES)의 후원에 의해 수행된 이 연구는 미국에서 벽돌코드(2008 Masonry Standards Joint Committee Code)에 따라 새로이 지어지는 조적 건물의 내진 성능에 관해 다음과 같은 전반적인 사항을 연구하였다.

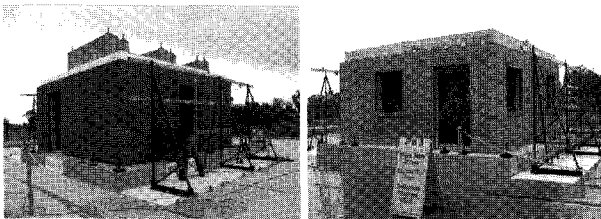
- 보강조적조, 치장 조적벽, 치장조적벽 연결재의 내진 성능 연구
- 치장 조적벽이 있는 보강조적조 및 목조 건물의 내진 성능
- 저층 보강조적 전단벽의 비탄성 거동 연구
- 치장 조적벽이 있는 보강조적조 및 목조 건물의 해석 모델 개발 및 변수 연구

이 연구과제에서는 실험적 연구와 해석적 연구가 함께 수행되었다. 준정적 실험은 텍사스 오스틴 대학과 노스 캐롤라이나 A&T 주립대학에서 진행되었고, 진동대 실험은 모두 캘리포니아 샌디에고 대학에서 진행되었다. 텍사스 오스틴 대학과 캘리포니아 샌디에고 대학에서는 이 모든 실험들에 대해 해석적 연구도 수행함으로써 강진 지역에서의 조적 건물의 구조 성능에 대한 많은 결과를 도출하였다.

핵심적인 실험적 연구 및 해석적 연구는 그림 11의 두 건물 실험체를 중심으로 이루어졌다. 두 건물 실험체 모두 평면 사이즈는 약 6m × 6m였으며 높이는 약 2.4m였다. 성능기반 설계를 향한 토대를 위한 연구였으므로 미시적 관점보다는 건물의 전체적인 성능을 평가하기 위한 거시적 관점에서 주로 연구를 수행하였다. 첫번째 실험체는 치장 조적벽이 있는 보강조적벽체 건물이었다고, 다른 실험체는 치장 조적벽이 있는 목재 골조 건물이었다. 두 건물 실험체 모두 미국 현행 설계 코드에 따라 설계되었고, 설계 지진 강도까지 대체적으로 만족스러운 성능을 보여주었다. 보강 조적벽 실험체의 경우 지반 진동이 3g에(설계 지진하중의 약 4배) 다다를 때까지 국지적인 피해만이 발생한 뒤 바다 미끄러짐에 의해 심각한 구조 성능 손실이 발생하였고, 목재 골조 실험체의 경우 설계 지진 진동에서 연결재가 못으로

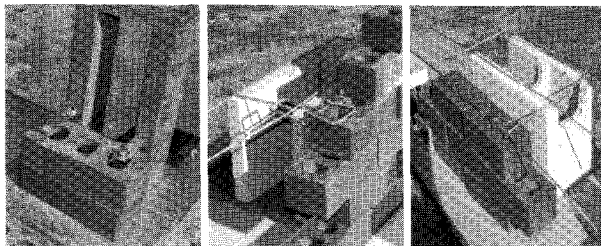
연결된 치장 조적벽이 면외 붕괴를 일으켰다. 진동대 실험에서 치장 조적벽은 면외 거동의 경우 단순한 질량으로 작용하였지만 면내 거동에서는 바닥면과의 마찰을 통해 에너지를 소산시킴으로써 단순한 치장벽이 아닌 내진 구조물로서의 고려가 필요함을 보여주었다.

두 실험체에서 모두 치장 조적벽의 내진 거동을 보장하기 위해서는 치장 조적벽 연결재의 역할의 중요성이 확인되었다. 그림 12는 두 건물 실험체에 사용된 치장 조적벽의 연결재들을 보여준다. 보강 조적벽 실험체에서는 치장 조적벽과 보강 조적벽과의 간격이 약 5cm였고, 목재 골조 실험체에서는 약 2.5cm였다.



1) 보강 조적벽체 건물 실험체 2) 목재골조 건물 실험체

그림 11 치장 조적벽이 있는 단층 건물의 진동대 실험



1) 목조 골재용 연결재 2) 조적벽체용 연결재 1 3) 조적벽체용 연결재 2

그림 12 워싱턴주 뷰리언 시청사

해석적 연구는 University of California, Berkeley에서 개발한 개방형 소프트웨어 OpenSees를 이용하여 수행되었다. 건물 실험체 이전에 수행한 단순 벽체의 면내 및 면외 실험(정적 및 진동대)을 통하여 건물 해석 모델이 개발되었고, 건물 실험체를 통해 약간의 보정작업이 이루어졌다. 보정된 해석 모델은 치장 조적벽의 붕괴, 보강 조적벽의 면내 및 면외 항복, 치장 조적벽 커넥터의 파괴 등 건물 전체적인 관점에서의 구조 성능들이 모두 실험결과와 일치하였다. 보정된 건물 해석 모델을 이용하여 변수 연구를 수행함으로써 인방보의 구조적 역할, 건물 모서리의 구조적 역할 등 실험 자체의 데이터만으로는 파악하기 힘든 사항들도 연구되었다. 이 연구에 참여하였던 교수들 일부는 National

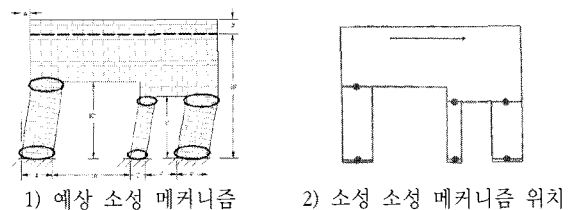
Institute of Standards and Technology (NIST)의 후원으로 보강 조적벽 건물을 중심으로 후속 연구를 진행 중이다. 후속 연구에서는 2층 및 3층 구조체도 진동대 위에서 실험될 예정이다.

## 7. 보강 조적 전단벽의 극한 설계 (Lepage와 Dill, Penn State University와 KPFF)

마지막으로 소개할 연구는 보강 조적 전단벽의 극한 설계법(소성 설계를 중심으로 한) 적용에 관한 연구이다. 미국에서 조적 구조설계에 강도설계법이 도입된 이후 조적구조물의 연성에 관한 토론이 활발히 진행되어 왔다. 그리고 보강 조적 전단벽의 경우 철근 콘크리트 분야와 마찬가지로 확보된 연성도를 이용한 극한 설계법의 적용에 관한 연구가 최근에 수행되었다. 이 연구 결과는 많은 논란 끝에 아직 조적 설계 코드에 정식으로 받아 들여지지 않았지만 흥미로운 관점을 제시한다. 딜과 레파즈가 제안한 극한 설계법은 다음과 같이 요약된다.

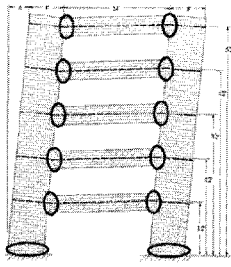
- 조적의 설계 재료수치를 50%만 적용하여 극한 지진 하중에서의 지붕 변위와 내력 분포를 구한다.
- 보강 철근을 결정한다.
- 주된 소성 메커니즘을 찾아낸다.
- 소성 메커니즘을 이용하여 전체 강도를 확인한다.
- 휨 소성 변형 구조 요소 및 전단 파괴 예상 구조 요소의 변위를 확인한다.

그림 13~15는 그들이 극한 설계를 이용하여 간단한 설계를 해 본 몇가지 예시를 보여준다. 실제로 이들은 철골에서 시작하여 철근 콘크리트에 적용된 연성을 이용한 극한 설계법과 그 개념은 동일하다. 이 방법은 강진 지역에서 허용 가능한 보강 조적조에 한정되지만, 내진 설계시 Pushover 해석이나 모드해석, 시간이력해석 등의 적용없이 간단하면서도 타당한 방법을 제공한다는 측면에서 흥미로운 응용 설계법이다.

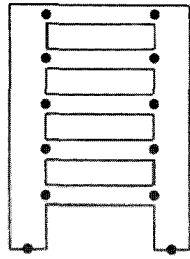


1) 예상 소성 메커니즘 2) 소성 소성 메커니즘 위치

그림 13 보강 조적벽의 극한 설계 예시 1

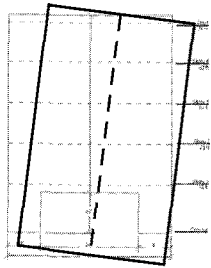


1) 예상 소성 메커니즘

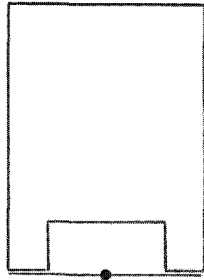


2) 소성 소성 메커니즘 위치

그림 14 보강 조적벽의 극한 설계 예시 2



1) 예상 소성 메커니즘




2) 소성 소성 메커니즘 위치

그림 15 보강 조적벽의 극한 설계 예시 3

## 8. 맺음말

현재 유럽이나 일본 그리고 미국 등지에서는 조적조를 이용한 건축이 공학적으로 설계 및 건설되고 있다. 조적 구조의 연구는 과거 우리의 유적을 지켜나가기 위해 필요할 뿐 아니라 쉽고 경제적이면서도 환경친화적이고 아름다운 구조물들을 구축할 수 있다는 점에서 지속되어야 할 과제이다.

앞에서 살펴본 바와 같이 미국에서는 건설되어 있는 조적 구조물을 위한 연구뿐만 아니라 새로이 지어질 조적 건물들을 위한 연구도 활발히 진행되고 있는 실정이다. 특히나 점점 지진 발생률이 증가하고 있는 우리나라의 현실을 감안해 볼 때 이러한 조적 구조물의 연구는 더 이상 늦추어놓는 것은 안된다. 이 기사를 통해 국내에서도 조적 구조에 대한 관심이 조금이나마 환기되기를 바란다. 

[담당 : 김홍진, 편집위원]