

조적채움벽 골조의 내진성능 및 내진보강

Seismic Performance and Retrofit of Masonry-infilled Frames

유은종 Eunjong Yu
한양대학교 건축공학부 교수

1. 머리말

조적채움벽 골조는 RC 골조 혹은 철골 골조에 조적조의 칸막이벽을 가진 구조물로 내진설계시 조적벽은 비구조재로 분류하여 하중으로서만 고려되지 실제 지진피해사례와 실험결과를 보면 채움벽이 구조물 거동에 큰 영향을 미쳐 순수 골조와는 완전히 다른 거동을 나타냄을 볼 수 있다. 일반적으로 채움벽이 있는 경우 구조물은 순수골조에 비해 횡하중에 대한 강성과 강도는 증가하나 변형능력은 감소되는 것으로 알려져 있는데, 채움벽의 파괴모드, 즉, 가로줄눈파괴, 대각인장파괴, 모서리압괴에 따라 강도의 증가 및 비선형능력에 미치는 영향에 상당한 차이가 있다.

파괴모드의 결정 및 최대강도의 산정을 위해서는 채움벽의 재료강도에 대한 정보가 반드시 필요하다. 하지만 조적조는 그 구성 재료가 지역에 따라 형태나 크기, 구성 물질이 다르므로 물성도 달라진다. 국내에서 조적개체 및 조적프리즘 재료시험 결과가 일부 보고된 바 있으나 아직 기본재료강도를 제한할 수 있을 정도로 시험데이터가 축적되지 못한 상태이다. 또한 국내에서 과거에 시공된 채움벽은 시공정밀도가 크게 떨어지는 경우가 있어 채움벽의 내진평가시에 이에 대한 고려도 필요하다. 본 기사에서는 국내의 조적조를 채움벽으로 가지는 골조의 내진성능평가를 위해 수행된 재료시험 및 부재시험의 결과를 소개하고 현행 내진성능절차에 의한 결과와 비교하여 현행 내진성능평가절차의 개선점을 파악하고자 하였다. 또한 국내 조적채움벽골조의 특성을 반영한 내진보강방법에 대해 의견을 밝히고자 한다.

2. 국내 조적조의 재료특성

외국의 내진성능평가기준의 경우 조적채움벽 혹은 조적조의 성능평가를 위해서는 조적의 재료시험을 요구하고 있으나 국내에서 이를 위해 재료시험을 실시하는 경우는 극히 드물고 일반적으로 FEMA 356 혹은 ASCE 41에 제시된 기본 재료강도를 근거로 내진평가를 수행하고 있다. ASCE 41-06에 규정된 조적프리즘의 평균압축강도 f_m 는 조적의 상태에 따라 8.2 MPa ~ 2.7 MPa이며, 평균전단강도는 0.246 MPa에서 0.118 MPa, 그리고 탄성계수 $E_m = 550 f_m$ 을 사용하고 있다. 하지만 이들 값은 설계기준이나 구조실험시 얻어진 재료강도에 비해 너무 낮은 값을 가지고 있는 것으로 판단된다. 실제로 이후 개정된 ASCE 41-13에서는 조적조 설계기준인 ACI 530에 따라 평균압축강도는 7 MPa, 평균전단강도는 0.678 MPa, 탄성계수는 콘크리트 벽돌조일 경우 $E_m = 900 f_m$ 으로 조정되었다. Eurocode의 경우 압축강도는 조적개체와 모르타르의 강도로부터 산정토록 하고 있으며, 전단강도는 최저 0.2 MPa, 탄성계수는 $E_m = 1,000 f_m$ 으로 규

정되어 있다.

조적조는 그 구성 재료가 지역에 따라 형태나 크기, 구성 물질이 다르므로 물성도 달라진다. 국내의 조적조는 외국과 상이한 조적개체를 사용하여 제작되므로 외국에서 제시된 재료특성치의 기본값을 그대로 사용할 수는 없다. 실제로 미국과 유럽에서는 중공이 있고 크기가 큰 점토벽돌을 많이 사용하나 국내는 구멍이 없고 상대적으로 작은 크기를 가진 콘크리트벽돌이 채움벽의 재료로 많이 사용된다.

국내의 콘크리트 벽돌 조적조의 재료특성에 관한 자료로서 이원호 등의 연구(조적개체 재료특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집, 2004)에서는 모르타르의 배합비에 따라 12.55 MPa ~ 8.73 MPa, 김희철 등의 연구(지진하중을 고려한 비보강조적조의 재료특성 평가에 관한 실험연구, 한국지진학회 논문집, 2001)에서는 8.4 ~ 6.4 MPa 등이 보고되었으며, 저자에 의해 수행된 연구에서도 10.3 ~ 6.01 MPa 으로 나타나 콘크리트 조적조의 경우 벽돌과 모르타르의 종류에 따라 최소 6.9 MPa부터 최대 20.7 MPa의 압축강도를 규정한 미국의 조적조 설계기준(ACI 530-11 혹은 TMS 602-11)의 규격과 비교해 대체로 낮은 값을 가지는 것으로 나타났다. 국내 조적조의 재료시험결과에서 특징적인 결과는 외국의 경우 경우와 비교하여 탄성계수가 매우 낮다는 점이다. 이원호 등의 연구에 의하면 $E_m = 88 f_m \sim 172 f_m$, 김희철 등의 연구에서는 $E_m = 100 f_m$ 가 보고되었으며, 저자에 의해 수행된 연구에서도 $E_m = 200 f_m$ 정도로 나타났다.

과거 국내에서 시공된 조적채움벽은 시공 상태가 불량한 경우가 많다. 따라서 모르타르 사춤이 충실히 채워지지 않은 경우에 대한 검토도 필요하다. 벽돌면적의 50%에만 모르타르가 채워지도록 한 시험체를 사용하여 실험한 최근의 연구결과에 의하면 압축강도는 평균 60% 정도, 전단강도는 50%로 감소하여 모르타르 채움면적에 거의 비례하게 강도가 감소하는 것으로 나타났다.

조적채움벽의 대표적인 파괴모드는 가로줄눈파괴와 사인장파괴를 들 수 있는데, 이때 채움벽의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 재료특성은 전단강도이다. 전단강도는 일반적으로 가로쌓기한 0.5B 두께의 프리즘 시험체의 대각 압축실험을 통해 추정하고 있으나 1.0B 두께

의 경우는 벽돌을 가로방향과 세로방향으로 교대로 배치하므로 쌓기 방법이 시험체와는 완전히 다르다. 실험 결과에 의하면 영식쌓기와 불식쌓기한 1.0B 조적의 단위면적당 전단강도는 가로쌓기한 0.5B 실험체에 비해 150% 이상 증가한 값을 나타내어 1.0B의 두께를 가진 조적채움벽의 강도는 실제보다 상당히 낮게 평가될 가능성이 있음을 알 수 있다.

채움벽의 강도는 벽돌 종류 및 배합비에 따른 모르타르의 강도뿐 아니라 쌓기 방법, 시공의 정밀도, 더욱이 재료의 열화 및 균열 등에 따라 변동폭이 매우 크다. 외국기준에서 기본 재료강도를 실제 예상 강도에 비해 상당히 낮은 값으로 설정한 것도 재료특성의 불확실성에 기인한 것이라고 생각된다. 하지만 이러한 접근방법이 반드시 안전측의 평가결과를 나타낸다고 볼 수는 없다. 이는 채움벽의 강도가 높을 경우 채움벽 반력에 의해 골조의 전단파괴발생 가능성이 있으며, 또한 전체적인 변형 능력이 낮아지기 때문이다. 국내에서 사용되는 조적조에 대한 광범위한 재료실험을 통해 재료강도의 변동폭을 파악하고 외국과 비교하여 국내조적조가 가지는 특성(예를 들어 낮은 탄성계수)이 내진성능에 어떠한 영향을 미치는지, 또한 이를 반영하기 위해서는 내진성능 평가절차중 어떤 부분에서 개선이 이루어져야 하는지에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

3. 조적채움벽 골조의 내진성능

채움벽골조의 내진성능평가에는 채움벽을 등가의 압축스트럿으로 치환하고 해석하는 방법이 많이 사용되고 있다. ASCE 41에서 등가압축스트럿의 강성은 보하단과 밀착된 균열이 없는 채움벽골조의 탄성해석결과를 기초로 하여 제시된 것이다. 하지만 실제의 경우 조적채움벽은 시공정밀도가 낮거나 크리프에 의해 보하단과 채움벽상단에 공극이 발생할 가능성이 높다. <사진 1>은 실제 채움벽 골조에서 관찰된 보하단과 채움벽 사이의 공극을 보여준다.

본 절에서는 채움벽상단에 공극이 있을 경우를 대상으로 한 실험결과를 소개하고자 한다. 실험체는 순수 골조, 0.5B 두께의 조적채움벽에서 공극을 가진 경우(IFS0.5B)와 공극이 없는 경우(IF0.5B), 또한 1.0B 두께의 채움벽골조에서 공극을 가진 경우(IFS1.0B)와 공



사진 1. 보하단과 채움벽 상단사이에서 발생한 공극의 예



사진 2. 채움벽의 좌굴에 따른 면외붕괴

극이 없는 경우(IF1.0B) 등 총 5개로 전체적인 하중-변위 곡선을 <그림 1>과 같다. 공극이 없을 경우 0.5B와 1.0B 채움벽골조는 순수골조에 비해 각각 약 2배와 3배에 해당하는 최대강도를 나타내었으나 공극이 있을 경우는 공극이 없는 경우에 비해 20~30% 정도 최대강도가 감소하였다. 변형능력은 최대강도가 높을수록 낮아지는 경향을 보였는데 특징적인 사항은 0.5B 조적에 공극을 가진 실험체는 변위각 1.5% 정도부터 채움벽 상단부에서 면외좌굴이 발생하여 이후 벽의 높이의 절반에 해당하는 부분이 면외로 전도되는 파괴가 발생하였다는 점이다<사진 2>. 채움벽 상단이 보하단과 밀착된 경우에는 0.5B 실험체에서는 강도가 최대강도의 80% 이하로 떨어지는 지점전까지 이러한 파괴가 발생하지 않았다. 따라서 공극으로 인해 채움벽의 상단부가 구속되지 않을 경우 인명안전에 위험이 되는 면외전도의 가능성이 높아지므로 이를 방지하기 위한 적절한 대책이 필요하다.

<그림 2, 3>는 실험결과와 ASCE 41의 규정에 따라

등가대각압축스트럿으로 치환한 모델의 푸시오버해석 결과를 비교한 것이다. ASCE 41에서는 가로줄눈 파괴를 기본으로 전단마찰 이론에 근거한 전단강도를 사용하도록 하고 있다. 해석결과중 실선(ASCE default value)는 채움벽의 전단강도 및 탄성계수를 ASCE 41-06의 기본값(전단강도 = 0.25 MPa, 탄성계수 = $550f_m = 4,504 \text{ MPa}$, 압축강도 $f_m = 8.19 \text{ MPa}$)으로 한 경우이며, 점선(Material test)는 재료시험에서 구한 가

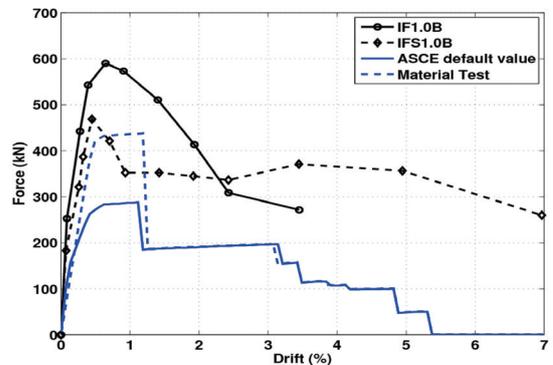


그림 2. 실험결과 및 푸시오버해석의 비교(1.0B 실험체)

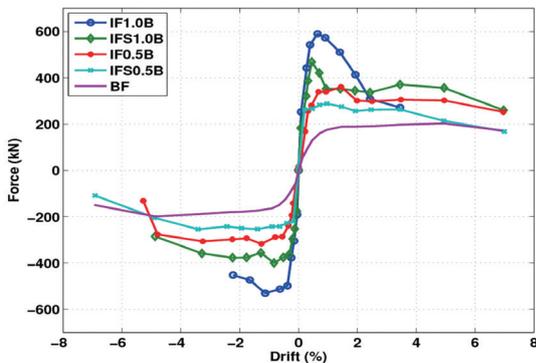


그림 1. 조적채움벽 골조실험체의 하중-변위 곡선

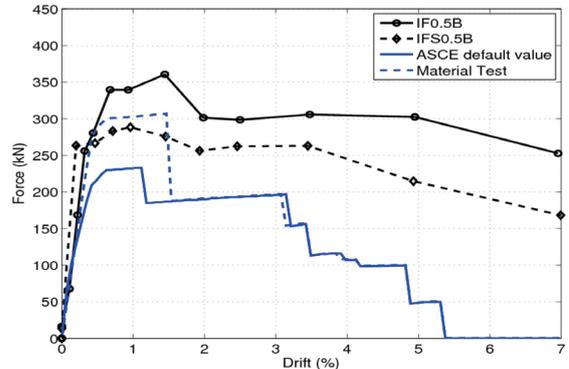


그림 3. 실험결과 및 푸시오버 해석의 비교(0.5B 실험체)

로줄눈전단강도 0.60 MPa를 전단강도로, 탄성계수는 $200 f_m = 2,056$ MPa, 압축강도는 10.28 MPa를 사용한 경우이다. 해석결과에서 볼 수 있듯이 ASCE의 기본재료강도는 구조물의 강도를 상당히 저평가하며, 수직응력이 없을 때의 부착에 의한 전단강도에 해당하는 가로줄눈전단강도를 사용하여 해석한 경우 공극을 가진 실험체의 최대강도와 비슷한 최대강도가 나타남을 볼 수 있다. 공극이 없는 실험체의 경우 횡변형에 의해 채움벽에 수직응력이 가해져 채움벽의 전단강도가 증가한 것으로 설명할 수 있다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 조적의 재료특성에는 상당한 불확실성이 존재하므로 실제 내진평가시에는 재료강도의 변동범위를 고려하여 다양한 조적강도에 대해 내진평가를 수행하고 이중 가장 불리한 결과를 사용할 필요가 있다.

등가대각 압축스트럿은 조적채움벽을 가진 실제건물의 내진평가에 사용할 수 있는 거의 유일한 실용적인 모델링 기법이다. 하지만, 이 방법은 조적채움벽의 거동을 간략히 모사하기 위한 것으로 기존의 연구결과에서 지적된 바와 같이 채움벽 주위 골조의 전단력과 휨모멘트 분포는 실제와 상당한 차이를 나타내는 등 채움벽과 주위골조의 상호작용의 모사에는 한계를 가지고 있으므로 해석결과로부터 내진성능을 판단할 때는 신중한 접근이 요구된다.

4. 내진보강 방안

국내의 대표적인 조적채움벽 골조건물로는 1970년대와 1980년대에 표준설계도면에 의해 건설된 학교건물을 들 수 있다. 학교건축물의 경우 재난시 대피장소로 활용되는 중요한 구조물임에도 불구하고 내진설계의 대상에 포함되지 않고 있었으나 2008년 중국 스촨성 지진 시 공공건물과 학교건물의 붕괴로 인해 대규모의 인명피해가 보고됨에 따라 국내에서도 내진설계규정이 제정되기 이전의 공공시설물에 대한 내진보강을 의무화하는 지진재해 대책법이 2009년 제정되었고, 이를 근거로 한 학교내진보강사업에 의해 순차적으로 내진보강이 이루어지고 있다.

국내의 학교건물은 건립시기에 따라 일정한 유형을 가지고 있다. 이중 1990년 이전에 건축된 학교건물의 경우 표준설계도에 따라 건축되어 거의 동일한 형태를

가지고 있는데, 이들은 7.5m정도의 폭을 가진 교실을 일렬로 배치한 길쭉한 장방형의 평면이 특징이다. 구조형식은 철근콘크리트조 골조이나 단변방향으로는 교실을 구획하는 채움벽이, 장변방향으로는 창호의 아래와 옆부분에는 조적허리벽과 날개벽이 존재한다.

일반적인 RC조 건물의 내진보강 방법으로는 강성 및 강도보강, 지진에너지의 소산을 목표로 하는 댐퍼의 설치를 들 수 있다. 하지만, 표준설계도의 골조는 비내진상세를 가지고 있고 조적채움벽에 의한 변형능력의 감소로 인해 내진성능이 부족할 것으로 예상된다. 따라서 골조의 변형을 전제로 하는 댐퍼보다는 강성 및 강도보강이 적절한 내진보강방법으로 판단된다. 강도 및 강성의 보강방법으로는 구조부재의 신설 혹은 기존 부재를 증타 혹은 자켓팅(jacketing)을 통해 보강하는 방법이 있다.

전단벽과 같은 구조부재의 신설을 통해 강도 및 강성보강이 이루어지는 경우 내진보강후 목표성능수준의 만족여부를 판단하는 성능평가는 기존의 성능평가법으로 수행 가능하지만 기존 부재의 보강을 위해서는 증타 혹은 자켓팅의 일체화정도를 고려한 합성부재의 비선형특성의 모델링파라미터가 필요하게 된다. 하지만 전단벽 신설의 경우는 건물내부의 조적벽 철거 및 기초 신설이 필요하나 기존 부재의 증타는 외부에 노출된 부재만을 대상으로 할 수 있으므로 조적의 철거 등 건물 내부에서의 작업이 요구되지 않는 장점을 가지고 있다.

채움벽골조의 경우 실험결과에서 볼 수 있듯이 채움벽상단의 공극은 내력 및 변형능력을 감소시키며, 면외전도 발생의 위험성을 증가시키므로 내진보강시 채움벽상단의 공극을 검사하고 제거할 필요가 있다. 또한 채움벽골조는 변형능력이 낮으므로 채용한 보강기법이 허용변형각 이내에서 보강능력이 발휘되는지 확인이 필요하다.

5. 맺음말

조적채움벽골조의 내진평가에는 재료특성에서부터 비선형해석을 위한 모델링 또한 해석결과의 분석을 통한 내진성능의 파악 등 모든 부분에서 불확실하고 불완전한 부분이 많이 가지고 있다. 하지만, 우리나라에서 지금까지 내진보강이 이루어진 가장 대표적인 건물은 학교건물로 대표되는 조적채움벽골조이기도 하다. 그동

안 수많은 내진평가 및 내진보강이 이루어졌음에도 불구하고 아직 외국과 비교하여 우리나라에서 사용된 조적조의 재료적 특성조차 제대로 파악되지 않고 있다. 대상건물의 특성을 반영하지 못하는 내진평가는 부정확한 평가결과를 낳게 되고, 필연적으로 내진보강이후에도 지진에 대한 안전성을 보장할 수 없을 것이다. 외국에서 개발된 내진성능평가절차의 철학을 받아들여 사용하고 하여도 국내의 상황에 적합한지에 대한 검토는 반드시 필요하며 앞으로 이에 대한 활발한 논의가 있기를 기대한다. □



유은종 교수는 UCLA에서 RC조 플랫폼슬래브 건물의 현장실험 및 손상탐지 기법에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, 대우건설 연구소를 거쳐 현재 한양대학교에 재직하고 있다. 주요 연구 분야는 건축구조물의 손상탐지, 유한요소해석, 철근콘크리트조의 내진성능평가 및 내진해석이다.
eunjongyu@hanyang.ac.kr

담당 편집위원 : 엄태성(단국대학교) tseom@dankook.ac.kr

학회인증사업 시행 안내

콘크리트 관련 국내 유일의 연구 전문 기관인 우리 학회는 관련 업계에서 개발한 신기술 등의 학회 공인 요청에 대처하고자 콘크리트 재료 및 공법 등의 기술개발 사항을 의뢰 받아 우리 학회 전문가의 면밀한 검토와 심의를 거쳐 검증하고 검증된 재료 및 공법은 인증서를 발급하여 그 우수성을 널리 알리고 신뢰도를 제고하고자 하오니 관심있는 업계의 많은 신청바랍니다. □

1. 인증의 종류

- 1) 재료 및 자재: 콘크리트 구조물의 구성 재료 및 보수·보강 재료 등
- 2) 설계방법 및 공법: 콘크리트 구조물의 설계방법과 시공, 보수·보강할 때의 공법
- 3) Software: 콘크리트 재료, 설계, 시공에 관련된 프로그램
- 4) 지침, 기준, 시방서: 콘크리트 재료, 설계 시공에 관련한 제 규정
- 5) 기타 콘크리트에 관련된 기술

2. 인증의 절차 및 기간

- 1) 절차: 신청서 및 서류 검토, 발표 및 현장(필요할 때) 심사 등 실시
- 2) 기간: 신청일로부터 1개월 이내(단, 시험이나 실험이 추가로 필요한 경우 신청자와 협의하여 조정)

3. 인증의 기한 및 갱신인증

- 1) 최초인증 유효기간 5년(2년 범위 내에 조정 가능)
- 2) 갱신인증은 최초인증 절차에 준하며, 3년 주기로 인증 연장 가능

4. 기술 인증 사후 특전

한국콘크리트학회의 학회지와 홈페이지에 기술내용 및 인증서 공고

5. 문의처: 학회 사무국

담당: 김법진 차장
Tel: 02-568-5985, E-mail: kci@kci.or.kr

사단법인 한국콘크리트학회

TEL : (02)568-5984~7 FAX : (02)568-1918 <http://www.kci.or.kr>