

지진하중을 받는 조적식 건물의 거동에 관한 연구현황

State-of-the-Art Report on Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings



박 창 규*

지진은 어쩌면 피할 수 없는 재난일 수 밖에 없다. 그것이 자연현상이든 신의 벌이든 인간의 생명과 재산을 앗아간다는 사실 앞에 우리가 설 수 밖에 없다면, 우리는 그 피해를 줄이기 위한 노력을 하지 않을 수 없다. 얼마전 고베지진을 경험한 우리는, 지진이 얼마나 무서운 재앙인가를 절실히 느낄 수 있었고, 기술자로서 안이한 자세로 일관할 수 없는 매우 심각한 문제가 아닐 수 없다. 차례에 본 소고는 1994년 1월, ASCE의 Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 1에 발표된, Michel Bruneau의 "State-of-the-Art Report on Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings"을 번역 소개하고자 한다.

많은 북아메리카의 구건물이 내진설계 규정이 없는 상태에서 지진에 취약한 조적식 구조로 건설되었다. 이러한 지진에 대한 위험은 북아메리카 동부에서는 상대적으로 새로운 것이다. 더구나 지진 위험의 성격과 다른 공학적 규제는 또 다른 새로운 문제를 발생시키고 있다. 조적식 건물의 내진성에 관한 연구 현황을 밝히고 있는 이 논문은

북아메리카의 일부에서 인정하고 있는 지식과 현재의 한계점을 개략적으로 살펴보았다. 기존 조적식 건물에 대한 내진성은 북아메리카 동부에서 공식화 되었다. 조적식 건물이나 부재의 지진에 의한 파괴형식이 기술되었고, 가능한 예를 제시하였다. 북아메리카의 건축 설계 시방서와 기준이 요구하는 실무 현황을 종합하였다. 기존 건물의 지진위험 해소를 위하여, Agbajian, Barnes, Kariotis(ABK)등의 방법론에 의해 창출된 Uniform Code for Building Conservation의 특별한 해설절차를 살펴보았다.

1. 서 론

현존하는 組積式(URM) 건물의 지진에 대한 위험이 오랫동안 문제시 되어 왔다. 그러나 북아메리카 동부에서는 다소 새롭게 인식되고 있다. 근래에 발생한 북아메리카의 지진피해는 20년 이상 내진설계의 규정을 요구해왔던 美동부나 캐나다에서 하나의 자극제가 되었으며, 일부 건물주들에게는 내진보강예산 수립을 촉구하거나 또는 이에 대한 계획을 심사숙고하게 하였다.

* 정회원, 부산대학교 해양토목공학과 조교수

기존 조적식 건물의 내진보강대책의 필요성과 보강정도를 결정하기 전에 먼저 구조해석이 선행되어야 한다. 그러나 북아메리카 동부에서, 대지진의 주기가 길고, 중간시기의 이렇다할 지진활동이 없는 점, 그리고 잦은 소규모의 지진등은 다른 각도의 새로운 문제점을 야기시키고 있다. 예를들면, 진도 6.0의 단기간의 지진은 기존 조적식 건물의 손상이 시작될 정도의 것이나, 현재의 구조진단으로는 위험하다고 평가하고 있다.

더구나, 북아메리카 동부의 지진위험대책 당국자들은 현재로는 다소 어려운 점이 있다; 그들은 기술자들을 갖춘 공공단체들이며 너무 안전측에 들거나 자유로운 해석적 가정이나 모델을 사용함으로써 신뢰성을 얻지 못하고 있다. 구조기술자들은 조적식 건물의 안전성에 대한 기술자적 책임을 다하여 당국자들의 신뢰를 얻도록 할 의무가 있다. 이러한 관점에서 지진하중을 받는 조적식 건물에 대한 정확한 진단을 얻기위한 방법의 개발은 대단한 의미가 있는 것이다.

근래에 많은 연구자들은 조적식 건물의 내진성에 대한 다각도의 연구를 하였으나, 그 결과가 분산되어 있어 북아메리카 동부의 실무자들로서는 일일이 다 알 필요가 없으며, 쉽게 이용될 수 없는 것이다. 따라서 본 소고는 지진하중을 받는 조적식 건물에 대한 연구현황을 살펴보고, 지금까지 보고된 사실을 종합하고 미래의 연구과제를 알아보고자 한다.

이 소고가 넓은 의미의 기존 조적식 건물에 관한 것이긴 하나, 특이한 형태의 구조물(즉, 단층 조적식 가옥이나, 흑벽돌집)이나 철근콘크리트나 강구조물의 내부에 사용된 조적부재는 예외로 한다.

2. 기존 조적식 건물의 지진위험에 대한 고찰

2.1 조적식 구조물 자체에 대한 문제점

북아메리카의 구건물의 대부분은 지진에 대한 설계규정이 없었던 시절에 건조된 조적식 구조물이다. 조적식 건물은 두 말할 것없이 지진에 매우

취약한 구조물이다.

이러한 구건물은 신건물에 비하여 지진에 대한 위험성이 더 크다. 그 이유는 구건물이 지진하중을 거의 또는 전혀 고려하지 않고 설계되어졌으며, 지진발생시 매우 큰 비탄성에너지의 해소능력이 없다는 것(즉 非延性)이다. 예를들면, 약 50년 전에는 바닥이 단순히 암석위에 또는 組積蕉葉(masonry corbel)위에 놓여졌다. 지진이 발생하면 벽은 횡방향으로 진동하며 바닥으로부터 분리가 시작된다.蕉葉위의 이러한 바닥들은 주요지진에서 흔히 볼 수 있듯이 지지부를 쉽게 이탈하여 구조물의 붕괴로 이어진다. 철근이 없는 조적식 벽은 지진시 폭발하듯 산산히 부서진다.

내진설계가 실시되면서 조적식 건축은 당연히 사라져 가고있다. 補強된 조적양식이 대신 새로운 양식으로 등장하고있다.

근래의 지진으로 사람들은 지진피해를 자각하게 되었고 기존건물의 내진성을 검토하게 되었으며, 필요한 대책을 강구하게 되었다. 이러한 관점에서 조적식 건물에 대한 내진성능에 대한 조사가 실시되었다. 이와 아울러 그에 대한 이해가 증진되었다. 이러한 노력은 일부 도시에서 최상의 지진위험에 건널 수 있는 조적식 건물 보강대책의 입안을 유도해 내었다.

그러나 여러형태의 기존 조적식 건물의 내진성에 대한 정확한 판단은 매우 복잡한 일이며, 특히 중소규모의 지진발생시 더욱 그러하다.

2.2 북아메리카 동부의 문제점

심각한 지진피해가 북아메리카 동부의 여러 곳에서 발생하였다. 불행하게도 소규모의 지진이 지진에 대한 경각심을 일깨워주지 못했다. 따라서 기존건물의 내진성조사가 지조하였으며 중요한 구조물 역시 그러하였다. 건물주들은 기술자들이 너무 조심스러운 가정을 함으로써 유리한 부재의 성능을 무시한 채 내진성능을 평가하지 않나 우려하고 있다.

건물주들은 지진의 위험과 그에 따른 건물폐기와 구조물의 보수비용을 비교검토해야 한다. 북아메리카 동부의 중부 적진지역에서 지진위험의 해

소가 효과적으로 이루어졌으며, 기존 구조물의 내진성능평가는 지진발생확률과 구조물의 성능 및 신뢰성에 밀접히 연관되어 있다. 생명의 보호가 일반 조적식 건물의 최우목적이나, 건물이 국가의 위상을 대변하는 것이라고 볼 때, 비록 사망자가 없다할지라도 건물의 심각한 손상은 큰 손실이다.

이러한 관점에서 기술자들의 최우선 과제는 너무 안전에 치우치지 않고 관대하지도 않는 구조물 및 건축부재 각각의 사실적인 내진성능과 延性을 종합판단하는 것이다. 너무 안전에 치우친 공학적 해석이나 설계가정을 사용한 내진성능평가로는 이러한 목적을 달성할 수 없다. 마찬가지로 構造部材 및 非構造部材의 실제성능을 과대평가한다면 이 또한 잘못된 위험한 착상이다. 실제적인 해석모델의 개발과 실제성능의 신뢰적이고 가장 정확한 평가기법의 마련이, 현재까지 밝혀진 건물의 성능에 대한 견해와 지금까지 연구된 해석기법으로부터 얻은 결과를 일치시킬 수 있는 방법이다.

3. 지진으로 인한 조적식 건물의 일반적인 파괴형태

근래의 지진발생은 조적식 건물의 지진위험성을 크게 부각시켜왔다. 이러한 건물의 내진성에 대한 광범위한 조사보고서가 많이 등장하였으며,^(1, 20) 이로부터 다음과 같은 사실이 알려졌다.

- 방대한 자료수집⁽¹⁹⁾과 일부 보고서를 제외하고, 많은 피해조사가 조적식 구건물이 많이 밀집되어 있는 시내 중심부에서 집중적으로 이루어져 피해가 더욱 크게 보고되었다.⁽²⁾
- 많은 경우 조적식 건물이 지진피해를 입지 않은 것으로 나타났으나,^(9, 10, 21) 이는 사실에 맞지 않으며 잘못 이해된 것이다.
- 선정된 조적식 건물이 손상이 없거나 지진과 무관한 하나의 예외가 있으나,⁽²²⁾ 이는 철근콘크리트나 강구조 건물과 같은 심층연구가 되지 않았다. 그 이유는 구건물의 원설계도가 없었기 때문이다.
- 재료 및 시공의 품질, 최대지반가속도, 지진 피해 사이는 밀접한 관계를 가지고 있다. 매

우 불량한 시공인 경우, 최대지반가속도가 0.1g로 낮은 경우에도 파괴가 발생하였다.⁽⁶⁾ 반면에 기념물, 공공단체나 행정부 건물과 같은 고품질의 조적식 건물은 최대지반가속도가 큰 경우라도 거의 파괴되지 않았다. 그러나 일부 유명한 건물은 심한 손상을 입었으며,⁽²³⁾ 뛰어난 성능의 앞선 가정은 여전히 확인되지 못하고 있다.

- 두꺼운 외벽의 석조 조적식 건물은 시공이 불량일 경우는 심하게 손상을 입거나 붕괴되었으나 지진에 대비하여 정밀시공을 한 경우에는 큰 지진에도 전혀 손상을 입지 않았다.^(14, 25)

또한 조적식 건물의 공통된 파괴형태는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 정착부의 결핍
- 정착파괴
- 평면내(in-plane)파괴
- 평면외(out-of-plane)파괴
- 평면내 및 평면외의 조합효과
- 간막이(diaphragm)관련 파괴

3.1 정착부의 결핍

많은 조적식 건물의 바닥과 지붕이 조적식 벽에 정착되지 않고 있다. 長線(joist) 및 들보의 끝이 벽에 단순히 지지되어 있다. 때때로 蕉葉(corbel)이 이러한 목적으로 건조된다. 그러나 대부분 조적식 벽은 지지된 들보 주위에 건조되었으며, 지지부를 벽돌로 촘촘히 채우고 있거나, 경비가 감

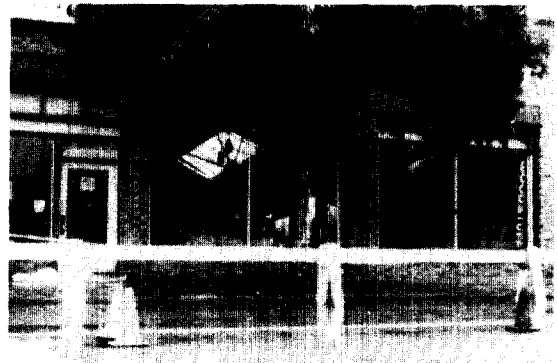


Photo. 1 Typical failure due to slip of roof joists off their wall supports(Santa Cruz, Loma Prieta Earthquake)

소되도록 하기위하여 들보의 받침부를 보호하기 위한 구형의 공간을 弱한 그라우트로 메꾸었다.

정착부의 결핍으로 외벽이 캔틸레버처럼 거동한다. 벽하단의 과도한 휨응력으로 인한 평면외 파괴의 위험은 벽높이의 증가와함께 증가하나, 더 중요한 사실은 장선이나 들보가 받침부로부터 이탈함으로써 구조전체가 파괴되는 것이다(사진 1).

각 받침부의 공칭 마찰력이 작은 동적하중에 의한 파괴를 방지한다고 하나, 믿을 만한 것이 못되며 내진평가대상에 고려하지 않는다.

3.2 정착파괴

조적식 건물에서 장선·벽의 정착은 여러 형태가 있으며, 지진과는 무관하게 건조되었다. 따라서 정착파괴의 가능성이 많다. 정착부 금속재료가 파괴되면서 연결부의 파괴가 동시에 발생한다. 이러한 파괴의 상세한 면은 여러 정착방식에 따라 다양하다.

3.3 평면내파괴

과도한 휨이나 전단은 조적식 건물의 형상비 (aspect ratio)에 따라 평면내파괴를 유발하기도



Photo.3 In-plane shear failure of URM spandrel beam (San Francisco, Loma Prieta Earthquake)



Photo.4 In-plane shear failure of URM pier (Oakland, Loma Prieta Earthquake)



Photo.2 In-plane shear failure of URM masonry wall (Santa Cruz, Loma Prieta Earthquake)



Photo.5 Flexural failure of slender URM column (Los Gatos, Loma Prieta Earthquake)

한다. 조적식 벽의 경우 평면내 전단파괴가 많으며, 쌍대각선(X) 전단균열로 나타난다(사진 2). 다행히도 전단균열이 과도하게 진전되기까지 벽은 중력하중을 지지할 수 있다.

조적식 건물의 前面은 많은 창문으로 이루어지며 스패드럴과 스패드럴사이의 짧은 기둥이 전단

파괴된다(사진 3과 4). 이러한 부재의 휨파괴가 가능하며 특히 가는 조적식 기둥의 경우가 많다(사진 5).

3.4 평면외파괴



Photo.6 Out-of-plane failure of URM top-story wall (San Francisco, Loma Prieta Earthquake)



Photo.7 Out-of-plane failure of URM all at center of building due to excessive diaphragm flexibility (Santa Cruz, Loma Prieta Earthquake)



Photo.8 Parapet failure of 100 front street building (Watsonville, Loma Prieta Earthquake)

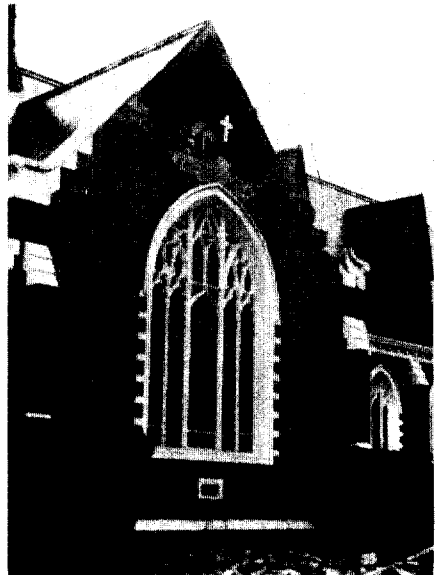


Photo.9 Failure of church gable(Watsonville, Loma Prieta Earthquake)

장선-벽 정착은 벽에 평면외 지지부를 제공한다. 이러한 정착부가 강하고 충분하다면, 바닥 간막이에 의하여, 각 단부에 진동이 전달되는 비구속된 높은 캔틸레버로부터 짧은 단층패널까지, 조적식 벽의 평면외 거동을 유발시킬 것이다. 조적식 건물은 평면외적 휨파괴의 가능성이 매우 크다(사진 6과 7). 더구나 평면내파괴는 벽의 중력하중내력을 위험상황으로 만들지 않으나 평면외파괴는 불안정하며 폭발적인 파괴를 유발한다.

난간(parapet)의 파괴가 이 범주에 속한다(사진 8). 이러한 비구조적 조적부재는 구속되어있지 않다면, 지붕밖으로 내민 캔틸레버벽처럼 거동한다. 또한, 건물꼭대기에 위치함으로써 최대의 진동을 받으며, 결과적으로 휨파괴의 위험이 높다. 교회나 기타 건물의 박공(gable)은 지붕에 충분히 정착되지 않으면 난간처럼 거동한다(사진 9).

다중위드벽(multiwythe wall)은 柱環이음(collar joint)이 불량(예, 모르타르가 없거나 불연속)하면 매우 위험하며, 각 위드는 別個의 얇은 벽처럼 독립적으로 거동한다. 外層이 다른 구조부재와 연결되지 않으면 매우 낮은 지진에도 먼저 파괴된다(사진 10). 이러한 점은 조적식 베니어(URM veneer)도 마찬가지다.

3.5 평면내 및 평면외의 조합효과

지진은 본래 두 방향의 힘으로 작용하며 따라서 각 조적부재는 평면내방향 및 평면외방향으로 힘



Photo. 10 Failure due to combined out-of-plane failure of parapet and inadequacy of collar joint in multiwythes URM wall(Quebec City, Saguenay Earthquake)

을 받는다. 평면내적 전단균열이 발생하면서 삼각형모양의 캔틸레버형 썩기가 형성되며, 그의 평면외적 강도가 균열전 본래의 벽패널보다 현저히 약화된다. 이러한 벽의 고립된 부분은 더욱 평면외 파괴의 가능성이 높으나 현장확인이 거의 불가능하다. 그리고 그러한 파괴는 평면외적 힘만에 의한 것으로 잘못 판단된다.

근접한 구조물을 연타함으로써 이러한 조합파괴형태가 가속된다. 이러한 현상이 심한 손상의 원인으로 인식된 것은 비교적 최근의 일이다. 독립부재가 없는 북아메리카의 구조적건물은 이러한 형태의 파괴가능성이 매우 높다(사진 11과 12).

3.6 간막이 관련 파괴

위에 언급된 바와같이 정상적으로 정착된 조적식 벽은 단층 패널처럼 평면외적으로 거동하며 양단의 바닥간막이에 의하여 진동한다. 따라서 이러한 간막이는 평면내방향으로 진동하며 그들의 휨강성은 조적식벽의 내진반응에 상당한 효력을 준다.

지진에 의한 간막이 자체의 파괴는 거의 발견되

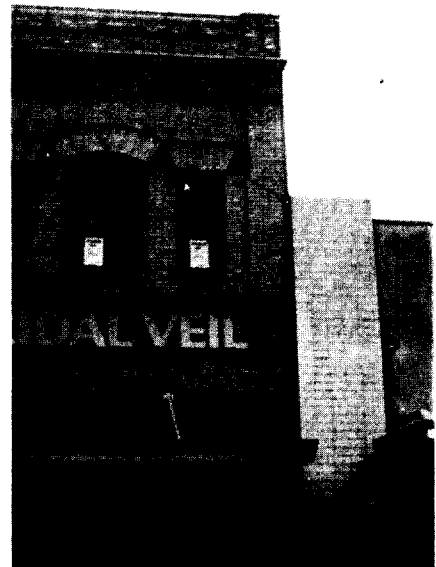


Photo. 11 Punching-induced cracking(Watsonville, Loma Prieta Earthquake)



Photo.12 Combined out-of-plane/ pounding failure (Santa Cruz, Loma Prieta Earthquake)



Photo.13 Diaphragm-induced corner damage to URM pier(Oakland, Loma Prieta Earthquake)

지 않았다. 이러한 이유는 지진조사팀들이 대부분 건물의 외부를 주로 조사했기 때문이다. 대부분의 경우 간막이 자체의 손상은 重力荷重耐力에 큰 손실을 주지 않는다. 그러나 휨강성이 있는 조적식 벽 사이의 바닥간막이는 깊은 보(deep beam)처

럼 기동하며 간막이 양단의 평면내회전은 벽 모퉁이에 손상을 유발할 수 있다. 간막이와 반력벽 사이의 전단력 전달이 불량하면 벽모퉁이의 손상을 가져오며, 특히 길고 폭이 좁은 건물에서 긴 방향 휨으로 인하여 간막이의 평면내전단력이 짧은 길이의 벽에 전달되지 못한다. 그 대신 간막이는 횡 방향으로 조적식벽을 밀어붙임으로써 조적식벽이 지지역할을 한다(사진 13).

4. 조적식 구조물에 대한 설계 시방서 및 규정

4.1 캐나다의 설계 시방서 및 기준

현재의 NBCC (National Building Code of Canada)⁽²⁵⁾에는 最小橫地震基底剪斷力 (minimum lateral seismic base shear force), V 를 다음과 같이 규정하고있다.

$$V = \left(\frac{V_e}{R} \right) U : V_e = vSIFW \quad (1)$$

여기서 U = 경험에 의한 보정계수(= 0.6)

v = 지진위험도에 따른 지역특성 속도비

S = 기간에 따른 지진반응계수

I = 지진중요도계수

F = 基礎계수

W = 구조물의 사하중

조적식 구조물은 아직도 허용응력설계법으로 설계한다.

NBCC에서는 PGA(최대지반가속도)나 PGV(최대지반속도)가 각각 0.08g, 0.10m/s를 초과하는 지역의 건물에서는 내하(耐荷) 및 횡하중 지지를 목적으로하는 조적의 사용을 금하고 있다. 이 조항은 새로운 조적식 건물의 건설을 금지시켰고, 대부분의 캐나다 도시에서, 시방서 규정이 제정되기 전에 건조된 모든 건물이 시방서 규정과 다른 사실을 지적하고 있다.

캐나다에서는 또한 조적식 건물 및 그 구조부재는 CAN3-S304-M Masonry Design for Buildings⁽²⁶⁾의 규정에 따라야 한다. 이 기준은 두가지 가능한 설계방법을 채택하고 있다. (1) 압축응력과

벽의 한계 세장비에 의존하는 경험법칙, 또는 (2) 안정성(stability)과 편심하중의 영향을 설명하는 반경험법을 병행하고, 탄성재료역학의 단순한 원리를 근거로한 공학적 해석이다. 근본적으로 전단응력과 축방향 및 휨의 조합응력에 대한 고전적 방정식들을 사용하고 있다.⁽²⁷⁾

$$\left(\frac{M}{S}\right) + \left(\frac{P}{A}\right) \leq f_m \quad (2a)$$

$$\left(\frac{M}{S}\right) - \left(\frac{P}{A}\right) \leq f_t \quad (2b)$$

$$\tau = \frac{VQ}{It} \leq v_o + 0.3f_{cs} \quad (2c)$$

여기서 $f_m, f_t, v_o =$ 각각 조적에 대한 허용 압축, 인장, 전단응력
 $f_{cs} =$ 사하중에 의한 압축응력

전단벽의 경우 f_t 가 영(zero)이 되도록 하는 특별규정도 있다. 이러한 직선적이고 단순한 접근은 캐나다의 조적식 구조물의 설계에 신중한 실무현황을 반영하는 것이다. 미국의 기준과 관례와는 다소 차이가 있다.

4.2 미국의 설계 시방서 및 기준

미국에서 가장 많이 사용되는 시방서는 세가지가 있다.

그중 주목할 만한 것으로 Building Code Requirements for Masonry Structure ACI 530-88 / ASCE 5-88⁽²⁸⁾이며, 미국 콘크리트학회(ACI)와 ASCE가 공동으로 개발한 것으로 북아메리카 동부에서 널리 사용되고 있다. 이 기준에서 사용되는 地震横等價静荷重(earthquake static-equivalent lateral load)은 지역적으로 또는 선택적으로 사용되는 ANSI A58.1-82⁽²⁹⁾로부터 얻어진다.

前과 같이 두가지의 조적식 구조물 설계법이 제시된다. 하나는 경험에 의한 것이고, 다른 하나는 단순응력해석에 기초한 것으로 ACI 530-88 / ASCE 5-88⁽²⁸⁾의 9章과 6章에 각각 기술되고있다. 설계에 사용된 단순응력해석 방정식은 약간 형식이 다르나 (2)식과 개념이 같다.

ACI 530-88 / ASCE 5-88⁽²⁸⁾ 역시 (1) ANSI

A58.1의 지진지역등급 3과 4에 있거나 또는 10m를 초과하는 높이의 건물에는 경험적 설계법의 사용을 금하고 있고, (2) 다중위도벽의 柱環이음이나 마구리(header)의 안전성에 특별한 주의를 배려하고 있으며, (3) 지진지역등급 2이상 지역의 구조물에 대해서는 지붕과 바닥을 벽에 정착하거나 철근을 사용하도록 규정하고 있다.

NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings⁽³⁰⁾은 미국전역에 사용하기에 적합한 耐震示方書의 규범으로 제시되며, ACI 530-88 / ASCE 5-88 기준을 약간 수정하여 인정하고 있다. 즉 NEHRP의 地震地域圖와 한계상태설계방식에 따르고 있다. ANSI A58.1-82의 지진지역등급 0-4는 근본적으로 NEHRP의 지진등급 A-E와 같다. 단단한 토질에 대한 NEHRP의 最小横地震基底剪斷力, V 는 다음과 같다.

$$V = C_s W < 2.5 \frac{A_A}{R} \quad (3a)$$

$$C_s = 1.2 \frac{A_v S}{RT^{2/3}} \quad (3b)$$

여기서 $A_v =$ 유효 최대속도 관련(EPV) 가속도

$A_A =$ 유효 최대 가속도(EPA)

$S =$ 토질계수

$R =$ 응답수정계수

$T =$ 건물의 고유주기

$W =$ 구조물의 사하중

최대지반속도와 EPA는 대략 다음과 같은 관계에 있다. $EPV = S_v / 2.5$ 여기서 S_v 는 스펙트럼 속도이며, 대체로 북아메리카에서는 5% 감쇠(damping)를 갖는 구조물의 경우, Newmark등⁽³¹⁾의 탄성설계 스펙트럼에 의한 최대지반속도의 2.3배에 해당한다. ACI 530-88 / ASCE 5-88의 허용응력은 NEHRP의 한계상태접근에 의하여 확대되었고, 이는 설계방정식의 성격상 다소 현혹스러운 점이다.

UBC(Uniform Building Code)⁽³²⁾는 美서부의 대부분 지역에서 내진설계에 사용되고 있다.⁽³³⁾ UBC의 最小横地震基底剪斷力, V 는 다음과 같다.

$$V = \frac{ZICW}{R_w} \quad (4)$$

여기서 C = 건물의 고유주기와 현장토질특성에 따른 계수

I = 중요도 계수

W = 구조물의 지진 사하중

R_w = 응답수정계수

Z = 미국의 地震地域圖에 의한 지진지역계수

부수적으로 좀더 합리적이고 실제적인 地震圖가 시급하다는 지적도 있었다.⁽³⁴⁾

조적식 구조물은 UBC의 24항에 따라 설계되어야 한다. 이 규정은 다중위드벽의 모든 위드가 그라우트나 연결부로 부착되어야 하며, 설계수평력이 전달되고 벽을 횡방향으로 지지할 수 있도록 모든 벽이 바닥이나 지붕 또는 다른 부재에 정착시킬 것을 요구하고 있다. 지진지역등급 2 이상은 벽에 철근을 넣도록 하며, 모르타르의 사용을 금하고 있다. 지진지역등급 3과 4에서는 전단벽의 전단력과 사인장과외에 대하여 지진설계하중의 150%를 적용하고 있다. 경형직 설계법은 지진지역등급 0 또는 1 地域內 높이 10m 이하의 건물에만 제한적으로 적용하고 있으며, 조적설계규정에 사용되는 방정식도 (2)식과 개념이 같다. 조합 조적식 건립(예, 다른 조적형식의 접착된 위드)은 환산단면원리에 따른다. 따라서 UBC는 앞에 언급된 다른 시방서나 기준과 개념이 유사하나, 다소 복잡하며 제한적이다.

마지막으로 캘리포니아에서는 延性 구조물을 選好하여 그 州에서 널리 사용하고 있는 Recommended Lateral Force Requirements and Commentary⁽³⁵⁾에는 조적식 건립에 대한 언급이 없다.

4.3 UCBC(Uniform Code for Building Conservation)

내진성 조사에 의하면 과거의 기존 조적식 건물이 앞에 언급한 설계 시방서나 기준에 맞지 않는다는 사실이 드러났다. 다른 평가방법이 없으므로 다른 위험조건을 치유할 복잡한 내진복구가 시급

한 것처럼 오해를 가져오기도 한다. 이러한 사고 방식은 현재의 시방서가 적용상 한계가 있으며, 舊時代의 재료와 시공법에 적합하지 않음을 깨닫지 못하는 것이다. 몇가지 예로, 이미 캐나다 동부에서는 건물내부의 조적식 구조시스템을 완전히 현대의 구조시스템과 재료를 교체함으로써 外貌로만 역사적인 모습을 보전하려고 하였다. 그러한 拔本策과 건물의 遺物的 손실은 항상 정당화되지 않는다. 대지진에서도 전혀 손상을 입지 않은 조적식 건물⁽³¹⁾의 몇가지 예가 舊時代 구조물 강도의 밝혀지지 않은 면을 대변해 준다.

UCBC(Uniform Code for Building Conservation)⁽³⁶⁾는 기존 건물의 문제점을 위하여 특별히 마련된 시방서이다. 이 시방서는 기존 건물이 영구히 보존될 수 있도록 다른 안전조치를 제공함으로써 건물용도변경도 감수하면서 합당한 안전대책을 마련하고 있다. UCBC의 1991년도 개정판은 조적식 내력벽의 건물을 위한 복잡한 내진성평가와 보강법을 삼입함으로써(부록 1항), 범칙규정으로써 빠른 인정을 얻고 있다. 이는 ABK⁽³⁷⁾에 의해 최초로 소개된 개념을 따른 것이며, ABK의 작품으로부터 현재의 UCBC에 이르는 발전과 이와 유사한 他 法規가 다른 곳에 잘 기록되었다.⁽³⁸⁾ UCBC의 특별 규정과 방법론은 기존 조적식 건물의 내진성 조사에 대한 구조공학적 절차를 표준화하였고, 정확한 조사를 위한 엄격한 지침을 마련하였다. 또한 다음과 같은 내용을 담고 있다. 부재의 시험과 공학적 기록의 再生(原本 紛失時)을 포함한 건물의 정보수집방법의 추천, 벽의 정착에 대한 포괄적인 평론, 정착된 조적식 벽의 動的 안정성 평가, 평면내외의 기둥을 고려한 조적식 벽과 간막이의 내진성에 대한 상세한 평론, 구조부재와 재료의 성능에 대한 추천등이다.

지진발생시 조적식 벽이 지붕이나 바닥으로부터 분리됨으로써 구조물의 붕괴가 시작될 가능성을 제거하는 것이 핵심과제이다. 구조물의 진단에는 조적식 벽과 간막이 사이의 연결부의 존재여부나 결함이 발견되어야 하며, 최소한 난간의 브레이싱을 포함한 새로운 壁定着시스템의 도입을 필요로하는 補修를 이 방법론은 자동적으로 요구하고 있다. 이러한 구조적 一體感이 없어지는 이 방법

론이 적용될 수 없다. 특별 규정은 또한 모든 간막이가 휨강성이 있는 건물, 최대 6층 건물, 적어도 건물의 각 축에 두 선이 평행한 벽으로 주로 이루어져 횡방향 힘을 지지할 수 있는 연직부재를 갖춘 건물에만 적용된다. 조적식 건물이 보편화된 캘리포니아 지역에서 UCBC가 널리 받아들여지고 있으나, 이 시방서의 목적은 단지 생명의 안전을 위한 것이다. 그러나 世習구조물에 무분별적으로 응용하는 것은 안전한 보존목적에 부합하는 내진대책이 아니다.

UCBC/ABK의 방법론은 조적식 건물의 내진 거동에 다소 새로운 개념을 사용하고 있다. 지반 운동이 지진방향과 평행한 벽에 의하여 각 층에 직접 그대로 전달된다고 이 이론은 가정한다. 이것은 이러한 벽이 평면내적으로 無限剛性(rigid)을 갖는다는 것을 의미한다. 따라서 각 층의 간막이는 확대되지 않은 본래의 지반운동에 의하여 조적식 벽과 만나는 곳에서 진동을 받는다. 이러한 간막이는 순차적으로 헤드벽(지반운동 방향과 직교방향의 벽)을 밀면서 평면외방향으로 진동시킨다. 그러므로 간막이의 動的 특성은 헤드벽(head wall)의 평면외적 振動強度와 벽-간막이 정착강도에 직접 영향을 준다. 이 방법론은 조적식 헤드벽과 분담하는 간막이-증폭 진동의 강도를 제어하기 위하여 간막이 경간에 제한을 두고 있다. 마찬가지로 이러한 헤드벽의 평면외적 파괴를 막기 위하여 동적 안정 개념으로부터 유도된 세장비에 제한을 두고 있다. 명백히 평면외적 안정성과 구조물의 일체성이 이 방법론의 첫째 목적이다.

다른 공학적 조치와 마찬가지로 기존 여건이 한계값을 초과하면, 구조 기술자 재량에 따른 방법으로 그 구조물을 보수해야 한다. 그러나 어떤 경우에는 이 방법론이 정확한 처방을 지시하기도 한다.

이 방법론의 모든 면과 절차를 상세히 논하는 것은 이 글의 연건상 불가하므로 讀者들은 UCBC/ABK의 문헌과 캘리포니아 세미나 자료^(39,40,41,42)를 참고하시기 바란다. 현재 캘리포니아의 數千 조적식 건물이 앞의 과정에 따라 改修되었고, 補修된 건물들의 내진성이 보고된 바 있다.^(10,11,19)

이 경험론의 한계 또한 인식되어야 한다. 특히

무한강성의 평면내 벽의 단순한 가정은 긴 다수의 세분된 벽에 적용 가능한 반면, 높고 휨강성이 큰 건물이나 많은 開口部로 인하여 횡방향 힘을 다수의 가는 기둥들이 지지하고 있는 건물정면에는 적용할 수 없다. 더구나 최근의 입증자료⁽²²⁾에 의하면 작고 무한강성의 건물이라도 基底地盤加速度가 層位置에서 상당히 증폭되고 있어, 그 후 UCBC의 가정에 다른 합리화가 제시되었다.⁽⁴³⁾ 또한 過負荷(overburden)된 벽의 동적 안정성에 대한 중요한 영향으로 연직 지반 운동의 영향을 무시한 결정은 비록 ABK의 연구에서 합리화되어 UCBC에서 받아들인 것이나, 논란의 대상이 되었다.⁽⁴⁴⁾

또 다른 문헌으로 ATC-22^(45,46)는 ATC-14^(33,47)로부터 발전한 것으로 NEHRP 설계 기준과 양립되는 형식으로 되어 있다. 또한, 모든 형식의 공학적 건조물을 망라한 넓은 안목을 가지고 기존 건물의 내진성 평가를 위한 방법론을 제시하고 있다.⁽³⁰⁾ ATC-22의 조적식 건물의 내진성 평가는 휨강성의 간막이나 조적식 받침, 돌레를 감싸는 벽(하나의 開口正面 허용)이 있다면, 많은 부분이 다시금 ABK 방법론에 근거하고 있다.

ATC-14의 일부로서, 기존 구조물의 내진성 평가에 대한 많은 자문이 수행되었다. 많은 구조 기술자들이 그들의 경험이나, 실무를 토대로한 변칙적인 방법을 사용하고 있거나, 고객의 요구가 있을 때만 현존의 방법론들을 사용하고 있음이 드러났다. 이것은 UCBC의 출판 이전의 일이었다고, 그 후 이러한 慣行이 바뀌었는지 여부는 미지수이다.

5. 종합 및 결론

기존 조적식 건물의 내진성에 대한 몇가지 事案을 제시하였다. 지진을 받는 조적식 건물이나 부재의 여러 파괴형태를 서술하였으며, 가능한 예를 제시하였다. 북아메리카의 설계 시방서 및 기준에서 요구하는 실무현황의 概觀은 현존하는 지침서의 기초적 형식을 강조함과 동시에 공학적 재료로서 조적식은 전통적으로 낮은 평가를 받고 있음이 강조되었다. UCBC에 의한 증진된 독특한 해석기

법과 일부 조적식 건축에 적용할 수 있음이 제시되었다. UCBC/ABK의 방법론(그리고 이와 유사한 다른 법규)은 기존 조적식 건물의 내진성 평가를 위하여 실무 기술자들에게 완전하고 응용이 용이한 점에서 북아메리카에서는 유일한 것이다. 로스엔젤레스 지역에서 광범위로 응용되고 있음도 특이할 사항이다.

지진이 강타한 지역을 방문한 탐사팀들의 보고에 의하면, 많은 수의 조적식 건물이 손상을 입거나 파괴되었고 어떤 경우는 근처의 다른 조적식 건물이 전혀 손상을 입지 않았다. 이와같은 사실은 관찰이나 채취된 재료의 시험을 분석한 결과에 국한된다. 오늘날의 정상적인 공학적 판단으로 많은 결함이 있는 일부 조적식 구조물이 여러 강도의 지진에서 어떻게 잔존할 수 있었는가를 실증한 출판물은 거의 없다. 마지막으로 역사적 유산을 온전히 보존하기 위하여 또 다른 내진복원론이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Scroll, R. E., and Stratta, J. L., "Reconnaissance Report on the May 2, 1983 Earthquake in Coalinga, California," Reconnaissance report of the Coalinga, California earthquake of May 2, 1983, Earthquake Engrg. Res. Inst., El Cerrito, Calif., 1984, pp.1-8.
2. Shah, H. C., Gere, J. M., Krawinkler, H., Rojahn, C., and Zsutty, T. C., "An overview of damage to the Coalinga commercial district." Reconnaissance report of the Coalina, California, earthquake of May 2, 1983, Earthquake Engrg. Res. Inst. El Cerrito, Calif., 1984, pp. 107-112.
3. Reitherman, R., Cuzner, G. J., Zsutty, T. C., and Smith, G. W., "Performance of unreinforced masonry buildings," Reconnaissance report of the Coalina, California, earthquake of May 2, 1983, Earthquake Engrg. Res. Inst. El Cerrito, Calif., 1984, pp.113-144.
4. Kariotis, J., "Survey of unreinforced masonry buildings," Reconnaissance report of the Coalina, California, earthquake of May 2, 1983, Earthquake Engrg. Res. Inst. Oakland, Calif., 1984, pp.145-156.
5. Adham, S. A., "The Borah Peak, Idaho earthquake of October 28, 1983-buildings and schools." Earthquake Spectra, 2(1), 1985, pp. 169-182.
6. Reitherman, R., "The Borah Peak, Idaho earthquake of October 28, 1983-performance of unreinforced masonry buildings in Mackay, Idaho," Earthquake Spectra, 2(1), 1985, pp. 205-224.
7. Swan, S. W., Miller, D. D., and Yanev, P. I., "The Morgan Hill earthquake of April 24, 1984-effects on industrial facilities, buildings, and other facilities," Earthquake Spectra, 1 (3), 1985, pp.457-567.
8. Esteva, L., "The Mexico earthquake of September 19, 1985-consequences, lessons, and impact on research and practice," Earthquake Spectra, 4(3), 1985, pp.413-426.
9. Hart, G. C., Kariotis, J., and Noland, J. L., "Masonry building performance survey," Earthquake Spectra, 4(1), 1988, pp.181-196.
10. Deppe, K., "Evaluation of strengthened and unstrengthened unreinforced masonry buildings in Los Angeles city," Earthquake Spectra, 4(1), 1988, pp.157-180.
11. Moore, T. A., Kobzeff, J. H., Diri, J., and Arnold, C., "The Whittier Narrows, California earthquake of October 1, 1987-preliminary evaluation of the performance of strengthened unreinforced masonry buildings," Earthquake spectra, 4(1), 1988, pp.197-212.
12. Muria-via, D., and Meli, R., "Dynamic behavior of masonry structures," Lessons learned from the Mexico earthquake-Reducing earthquake hazards, Earthquake Eng. Res. Inst. El Cerrito, Calif., 1989, pp.188-191.
13. Meli, R., "Seismic behavior of masonry buildings," Lessons learned from the Mexico earthquake-Reducing earthquake hazards, Earthquake Eng. Res. Inst. Oakland, Calif., 1989, 181.
14. Armenia earthquake reconnaissance report, Earthquake Engrg. Res. Ins. El Cerrito, Calif., 1989.

15. Mitchell, D., Tinawi, R., and Law, T., "The 1988 Saguenay earthquake-a site visit report," Geological Survey of Canada, Open File 1999, 1989.
16. Loma, Prieta earthquake reconnaissance report: earthquake spectra, supplement to volume 6, Earthquake Engrg. Res. Inst. El Cerrito, Calif., 1990.
17. Bruneau, M., "Preliminary report of structural damage from the Loma Prieta (San Francisco) earthquake of 1989 and pertinence to Canadian structural engineering practice," Can. J. Civ. Engrg., 17(2), 1990, pp.198-208.
18. Cross, W., and Jones, N. P., "Historic buildings in the county of Santa Cruz and the Loma Prieta earthquake of 1989," Proc., 2nd Int. Conf. on Repairs and Maintenance of Historical buildings, Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., 1991, pp. 133-144.
19. Damage to unreinforced masonry buildings in the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989, Calif. Seismic Safety Commission, Sacramento, Calif., 1991.
20. Kariotis, J., Krakower, M., and Roselund, N., "The engineers' view-Loma Prieta: historic buildings, earthquake damage and seismic strengthening, California Preservation found., Oakland, Calif., 1991.
21. Freeman, J. R., "Earthquake damage and earthquake insurance," McGraw Hill, New York, N. Y., 1932.
22. Tena-Colunga, A., "Seismic evaluation of unreinforced masonry structures with flexible diaphragms," Earthquake Spectra, 8(2), 1992, pp.305-318.
23. Elsesser, E., Naaseh, S., Walters, M., Sattary, V., and Whittaker, A. S., "Repair of five historic buildings damaged by the Loma Prieta earthquake," Proc. Seismic Historic Building Conf., Western Chapter, Assoc. for Preservation Technology, San Francisco, 1991, 4-1, 4-39.
24. DerKiureghian, A., "Observations from Armenian earthquake of December 7, 1988," Proc., 4th U.S. Nat. Conf. on Earthquake Engineering, Earthquake Engrg. Res. Inst. El Cerrito, Calif., 1990.
25. National Building Code of Canada, Nat. Res. Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 1990.
26. CAN3-S304-M84, Masonry Design for Buildings, Can. Standard Assoc., Rexdale, Ontario, Canada.
27. Gere, J. M., and Timoshenko, S. P., "Mechanics of materials," Brooks /Cole Engrg. Div., Belmont, Calif., 1984.
28. Building code requirements for masonry structures (ACI 530-88 /ASCE 5-88), ASCE, New York, N. Y., 1988.
29. Minimum design loads for buildings and other structures, Am. Nat. Standards Inst. New York, N. Y., 1982.
30. NEHRP Recommended Provisions for Development of Regulations for New Buildings-Part 1: Provisions, Build. Seismic Safety Council, Washington, D. C.
31. Newmark, N. M., and Hall, W. J., Earthquake spectra and design, Earthquake engrg. Res. Inst., El Cerrito, Calif., 1982.
32. Uniform building code, Int. Conf. of Build. Officials, Whittier, Calif., 1991.
33. Poland, C. D., Malley, J. O., "Recommended modifications to ATC-14," Nat. center for earthquake engineering research, technical report NCEER-89-0012, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N. Y., 1989.
34. Kariotis, J., "Preservation of historic buildings: coping with mandatory code compliance," Proc. Seismic Historic Building Conf., Western Chapter Assoc. for Preservation technology, San Francisco, 12-1, 12-9, 1991.
35. Recommended lateral force requirements and commentary, Struct. Engrg. Assoc. of California, Sacramento, Calif., 1990.
36. Uniform code for building conservation, Int. Conf. of Build. Officials, Whittier, Calif., 1991.
37. Methodology for mitigation of seismic hazards in existing unreinforced buildings: The methodology," ABK-TR-08, Agbabian Assoc., El Segundo, CA., 1984.

38. Draft commentary to the structural engineers association of California and California building officials joint recommended unreinforced masonry building seismic safety provisions, California Seismic Safety Commission, Sacramento, Calif., 1990.
39. Earthquake hazard mitigation of unreinforced masonry buildings built prior to 1934, Struct. Engrg. Assoc. of California, Sacramento, Calif., 1981.
40. Earthquake hazard mitigation of unreinforced masonry buildings built prior to 1934-update, Struct. Engrg. Assoc. of California, Sacramento, Calif., 1983.
41. Earthquake hazard mitigation of unreinforced pre-1933 masonry buildings, Struct. Engrg. Assoc. of California, Sacramento, Calif., 1986.
42. Seminar on the new state wide earthquake hazard reduction code (1991 UCBC appendix chapter 1), Struct. Engrg. Assoc. of California, Sacramento, Calif.
43. Zsutty, T., "Overview-ABK methodology," Seminar on the new state wide earthquake hazard reduction code (1991 UCBC appendix chapter 1), Struct. Engrg. Assoc. of California, Los Angeles, Calif., 1991.
44. Priestley, M. J. N., "Seismic behaviour of unreinforced masonry walls," Bull. New Zealand Soc. for Earthquake Engrg., 18(2), 1985, pp.191-205.
45. A Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings (Preliminary), Applied technology council report ATC-22, Appl. Technol. Council, Redwood City, Calif., 1989.
46. Seismic Evaluation of Existing Buildings: Supporting Documentation," Applied technology council report ATC-22-1, Appl. Technol. Council, Redwood City, Calif., 1989.
47. Evaluating the seismic resistance of existing buildings, Applied Technology Council Report ATC-14, Redwood City, CA., 1987. 