

지진력결정에 관계된 계수의 신뢰성

이 한 선*

1. 서언

우리나라에서 내진설계가 의무화 된 이후로 이의 실무 적용상 적지않은 오해와 혼란이 있어 왔다. 이는 우리나라의 경우 지진의 경험이 많지 않고 또 내진설계 기준의 제정이 근래에 이루어져(1988. 7. 1) 그 역사가 짧은 연유 때문일 것이다.

실제로 오랜 기간 지진에 시달려온 외국의 경우에도 내진설계 기준의 제정은 충분한 이론 및 실험적 검증을 거쳐 이루어진 것은 아니며, 여러번의 기준개정을 통하여 현실에서 일어난 예상치 못한 지진피해현상과 실험과 이론적연구에 의해 밝혀진 것을 뒤늦게 반영하는 수순을 밟아왔다고 본다.

현재 우리나라에서 적용되고 있는 내진설계규정은 이러한 의미에서 결코 완전한 것이라고 말할 수는 없으며 추후 계속 보완 발전시켜 나가야 할 것은 말할 나위도 없겠다.

그러나 이러한 규정의 보완 발전시키는 문제 이전에 현재 규정에서 제시하고 있는 지진력 결정에 관한 제반 계수의 철학적 배경을 이해하고, 이 값들의 적용상 수반되는 신뢰성에 대하여 좀더 확실한 感을 가지고 있다면, 설사 규정상의 값에 실험적 이론적 배경자료가 부족할지라도 좀 더 효율적이고 합리적인 내진설계를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본문은 미국 U.C.Berkeley에서 행한 내진

실험 및 이론연구를 바탕으로 우리나라 내진 규정이 주 본보기로 삼고 있는 미국 ATC 규정案(Recommendation)에 나타난 지진력 결정에 관련한 제반계수의 신뢰성에 대하여 논하고자 한다.

2. 지진력 결정에 관계되는 계수들

2.1 ATC 3-06의 설계지진(Design Earthquake)

ATC 3-06의 설계지진은 지역에 따라 다른 계수가 적용된 5% 감쇠율의 선형탄성설계 응답스펙트럼(Linear Elastic Design Response Spectrum: LEDRS)으로서 주어진다.

매우 중요한 시설인 경우 이 LEDRS를 적용하여 최대예상지진(Maximum Credible Earthquake)에 대해서도 구조물이 탄성적으로 거동하도록 설계하겠으나, 그렇지 않은 건축물의 경우 이러한 설계는 비현실적으로 과다설계이며, 비경제적 설계가 됨을 면치 못할 것이다. 따라서 ATC 案은 최대예상지진에 대하여 어느 정도의 제어가 가능한 비탄성변형을 허용하고 있으며, 이 비탄성변형은 최대변형이 지나치게 크게 일어나지 않는 한 선형탄성거동시 요구되는 강도 보다 훨씬 낮은 강도로 설계를 가능하게 한다.

ATC案에서는이 비탄성변형의 유리한 역할을 반응수정계수(Response Modification Factor) R 에 의해 LEDRS를 $\frac{1}{R}$ 만큼 감소시킨 비탄성설계응답스펙트럼(Inelastic Design Response Spectrum:

* 정희원, 대한주택공사 주택연구소 선임연구원 공학박사

IDRS)의 도입으로써 반영하고 있다.

2.2 지진력계산에 관계되는 계수들

지진력의 계산은 대체로 다음과 같은 형식으로 결정된다.

$$V = C_s W = \frac{C_{sp}}{R} W \quad (1)$$

여기서

V : 밀면전단력

C_s : 설계지진계수

C_{sp} : 선형탄성 응답스펙트럼가속도(Linear Elastic Response Spectral Acceleration)

R : 감쇠계수(혹은 반응수정계수)

W : 구조물의 관성력에 기여하는 유효 질량의 무게를 뜻한다.

식(1)에 나타난 지진계수 C_s 의 값은 여러요인등에 의해서 결정되며, 대체로 이들은 다음과 같은 세가지로 분류할 수 있다.

첫째: $\frac{C_{sp}}{g}$ 로 나타낼 수 있는 선형탄성설계 응답스펙트럼(Linear Elastic Response Spectral Acceleration : LEDRS)

둘째: 비탄성설계 응답스펙트럼(Inelastic Design Response Spectrum : IDRS)

세째: 건물기본주기의 예측등이다.

3. 선형탄성설계 응답스펙트럼

LEDRS의 성립을 위해 ATC 3-06은 유효최대가속도 (Effective Peak Acceleration : EPA)라는 개념을 도입하고 있다. 이것은 설계지진강도를 특징지주기 위하여 2개의 변수를 사용하고 있는데 첫째는 EPA(A_e)이고 둘째는 유효 최대 속도-관련 가속도 (Effective Peak Velocity-Related Acceleration) (A_v)이다. ATC에 따르면 어떤 특정한 지진동에 대하여 이들 변수는 다음과 같은 과정을 거쳐 얻어진다.

- 주어진 지진파에 대하여 5% 감쇠계수로 선형탄성 가속도 스펙트럼을 구한다.
- 고유주기 0.1초에서 0.5초 범위에서 응답가속도스펙트럼의 평균값을 구하고, 고유주기 1초 부근에서 응답속도스펙트럼의 평균값을 구한다.
- 이 평균값을 각각 2.5로 나누어 EPA와 EPV를 얻는다.

ATC규준안에서는 가장 극심한 경우의 설계지진으로 A_e 와 A_v 를 각각 0.40으로 제시하고 있고 응답증폭계수(Amplification Factor)로서 2.5를 적용하고 있다.

그러나 이 ATC안의 LEDRS에서 사용하고 있는 지진파의 세기는($A_e=A_v=0.40$) 반드시 안전측이라고 말할 수 없다. 즉 그림1과 그림2에서 보여지듯이 1985 Mexico와 Chile에서 일어난 지진파에 대하여 얻어진 LEDRS가 일정한 고유주기 범위에서는 ATC의 LEDRS를 훨씬 넘어서는 것을 발견할 수 있고, 응답증폭계수로서 멕시코지진은 $985/168=5.85$, 칠레지진 3.6을 기록하고 있어 ATC가 사용하고 있는 2.5보다 훨씬 상회하고 있음을 알 수 있다.

4. 비탄성 설계응답스펙트럼(IDRS)의 신뢰성

4.1 반응수정계수

2.1에서 이미 언급하였듯이 일반설계규준에서

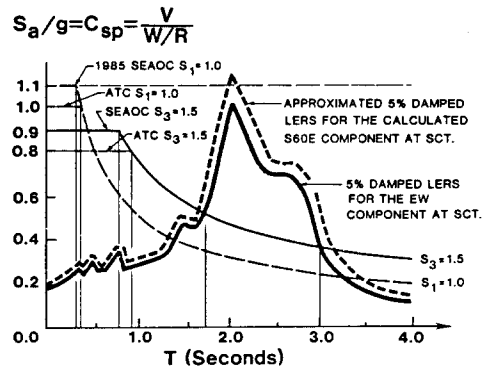


그림 1. 1985. 9. 19 멕시코 SCT에서 기록된 EW 성분의 지진파에 대한 5% 감쇠 LERS와 ATC 3-06와 SEAOC(1985)에 의해 제시되고 있는 5%감쇠 LEDRS와의 비교

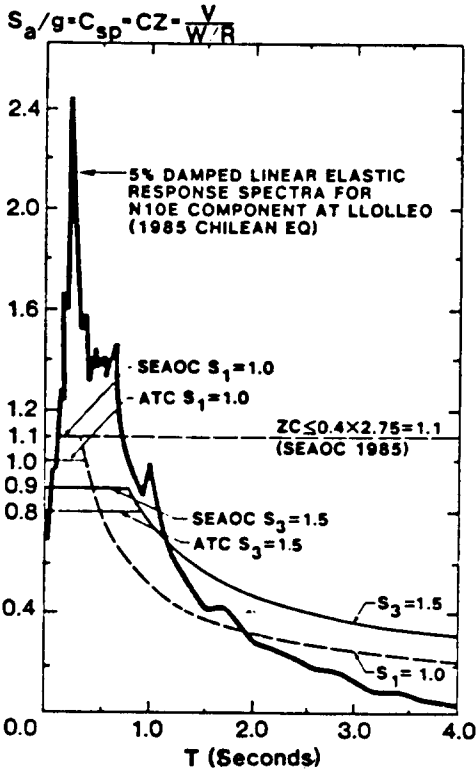


그림2. 1985. 3.3 칠레 LLOlleo에서 기록된 N10E 성분의 지진파에 대한 5% 감쇠 LERS와 ATC 3-06와 SEAOC(1985)에 의해 제시되고 있는 5% 감쇠 LEERS와의 비교

제시하고 있는 응답스펙트럼은 극심한 지진인 경우 건물의 비탄성 변형에 의한 에너지 흡수를 기정 사실로 보고 선형탄성 응답스펙트럼에서 요구되는 강도보다 훨씬 적은 지진력에 대해서 탄성설계법(허용응력설계법) 혹은 극한강도 설계법을 사용하여 설계하도록 허용하고 있다.

ATC案에서는 비탄성변형의 효과를 고유주기 T와 무관한 반응수정계수 R에 의해서 요구되는 강도를 선형탄성일 경우의 $\frac{1}{R}$ 로 감소시켜 설계에 반영하고 있다.

ATC의 IDRS는 UBC(1988)와 달리 “구조물의 현저한 항복상태(Significant Yield Level)” 즉 어떤 구조물에서 첫 소성흔지 혹은 초기 항복을 유발시키는 수준까지의 응답스펙트럼을 의미한다.

반응수정계수 R의 의미를 좀 더 확실하게 이해하

기 위해 ATC 3-06의 관련 해설을 인용해 본다.

ATC commentary의 4장에서 아래와 같이 언급하고 있다.

“R값은 구조시스템이 초기 항복을 지나서 최종 극한하중에 이르기까지의 변형범위에서 구조물의 고유한 감쇠 및 연성(ductility)를 감안하기 위한 경험적 응답계수이다.”

그러나 ATC에서 사용되는 IDRS는 이미 5% 감쇠 LERS에 근거하고 있다는 것을 유의하여야 하며 철골 구조와 같이 소성변형인 상태에서 감쇠 계수가 5% 미만인 경우 이의 차이를 감안해야 할 것이다.

같은 ATC commentary 3장에서 다음의 서술 부분을 인용한다.

“반응 수정계수 R은 구조물이 대체로 설계하중에 대하여 현저한 항복(Significant yield)을 일으키더라도 이 하중 이상의 초과하중(Overstrength)을 보유하고 있다는 것을 감안하여 결정되었다.”

“R값은 판단에 의해 선택 사용되어야 한다. 예를 들면, (소성)메카니즘을 형성하는데 요구되는 모든 소성흔지가 설계강도에 가까운 외력에 의해 동시에 형성되는 경우와 같이 낮은 Redundancy를 보유한 구조물에 대해서는 낮은 R값이 적용되어야 한다.”

4.2 내진 설계에서의 연성(Ductility)의 필요성과 그의 적절한 이용

내진 설계에 있어서 전체구조물이 연성적(Ductile) 이고 안정된 이력거동을 보여주기 위해서는 구조부재, 접합부 및 기초등에서의 주요 비탄성영역이 특별한 배려로 큰 연성과 안정된 이력거동을 가지도록 상세 설계되어야 한다. 이러한 요구에는 다음 두 가지의 이유가 있다.

첫째: 이것은 순 구조물로 하여금 각 구조 요소의 최대강도의 합으로 주어지는 구조물 전체의 최대 잠재(Potential)강도에의 도달을 가능케하며

둘째: 큰 구조연성은 순 구조물이 하나의 소성 메카니즘 상태에서 거동하는 것을 가능케하며, 따라서 큰 에너지소산(Dissipation)에 이를 수 있게 한다.

이러한 두 가지 이유중에서 유독 두번째 이유만 이 강조된 나머지, 설계 강도의 저감에만 연성이 인용되곤 하여 왔다. 이러한 설계강도의 저감이 경우에 따라 정당화될 수 있지만, 큰 연성 값을 무분별하게 적용하여 지나치게 낮은 하중상태에서 설계한 구조물에 대해서는 그 내진안전성에 우려를 표하지 않을 수 없다.

그림3에 보여진 전형적인 이중골조의 거동을 예로 들어 연성의 역할에 대하여 언급하고자 한다. 이 그림에서 전체 구조물이 최대강도($R_T = R_{W1} R_{W2} + R_F$)에 도달하기 위해서는 전단벽 W_1 은 그 연성비가 4.3을 넘어야 하고 전단벽 W_2 및 모멘트 골조 F 의 연성비는 각각 2.8과 1.0보다 커야만 된다는 것을 알 수 있다. 또한 연성 모멘트 골조의 변형 능력(Deformability)은 전단벽에 비해 훨씬 크지만 그 요구되는 연성비(Ductility Ratio)는 전단벽에 비해서 훨씬 작으며 전단벽이 파괴되기 전까지는 모멘트 골조의 연성이 활성화 될 수 없다는 것을 알 수 있다.

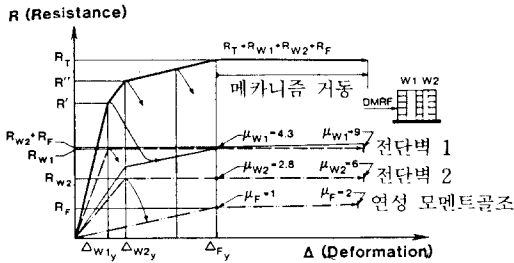


그림3. 전체 구조물의 최대 잠재강도(R_T)와 메카니즘거동에 다르기 위하여 각 구조요소, (W_1 , W_2 , DMRF)가 지녀야 할 연성(μ)의 필요성을 나타내는 한 예

4.3 실험을 통한 R 값의 성분분석

U.S - Japan 공동연구의 일부분으로서 U.C Berkeley 에서 행해진 $\frac{1}{5}$ 축소 7층 철근콘크리트 이중골조(전단벽 - 모멘트연성골조)의 실험결과(그림4)를 바탕으로하여 위에서 언급한 R 값에 기여하는 요인으로서 연성(Ductility)과 초과강도(Overstrength)의 영향을 분석하고자 한다.

그림4(b)는 최대지붕 횡치집률(Drift Index)과 관련하여 전체구조물과 전단벽에 의해 지탱되는 최대 밀면전단력과 밀면전도 모멘트를 나타내고 있다. 실제 구조물의 밀면전단력은 1979 UBC 설계 하중(1.4E)보다 3.75배 크며, ATC 3-06에 의한 설계값 보다는 더 큰 비율로 크다는 것을 알 수 있다. 그림4(b)의 곡선은 일본의 Miyagi-Oki(MO) 지진파와 미국의 Taft(T)의 지진파를 이용하여 진동대 실험을 한 결과 나타난 최대치를 연결하여 이루어진 것이다.

이 실험 결과의 R 값 성분분석을 용이하게 하기 위하여, 그림5에서 진동대에 적용된 T40.3의 응답 스펙트럼과 ATC 3-06의 LEDRS, 그리고 반응수정계수 R 로 축소된 IDRS를 비교한 곡선을 보여주고 있다.

우선, 이 구조물의 설계강도는,

$$(C_s)_r = \frac{1.2 \times 0.40 \times 1.0}{8 \times 0.48^{2/3}} \approx 0.11$$

로서 주어졌으나, 실제 초기 항복강도는 $(C_s)_r = 0.18$ 에서 일어났고 최대강도는 $(C_s)_{max} = 0.51$ 이었다.

여기서 실제 초기항복 강도가 최소설계강도보다 $\frac{0.18}{0.11} = 1.64$ 배 높은 것은 내진설계시 강도(strength)

뿐만 아니라 강성(stiffness)과 안정성(stability)등 다른 설계 요구조건도 만족시켜야 함에 따른 실제 강도의 증가를 의미한다. 또한 초기항복에 비해서

최종극한강도는 $\frac{0.51}{0.18} = 2.83$ 배가 된다는 것을 알

수 있다.

그림5를 관찰하면서 실제 R 값 즉 연성(Ductility)만에 의한 감소율 R_a 는 진동대 지진이 주어질 당시의 구조물의 상황, 즉 누적된 손상의 양에 따라 틀릴 수 있다는 사실을 발견할 수 있다.

만약 $T = 0.5$ 초 일때(건설직후), T40.3의 지진이 가해졌으면 R_a 값은 $1.4/0.51 = 2.7$ 정도 되었을 것이다. 그러나 중간정도의 지진에 의해 이미 손상을 받았을 경우, 즉 $T = 0.8$ 초일 경우 R_a 는 약 1.5가 되고 T 가 1.0초가 될 경우 더욱 더 낮아질 것이다.

반면 ATC의 LEDRS(5% 감쇠율, S_3 토질)가

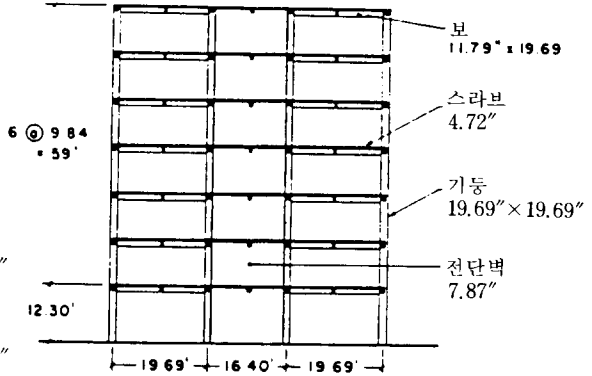
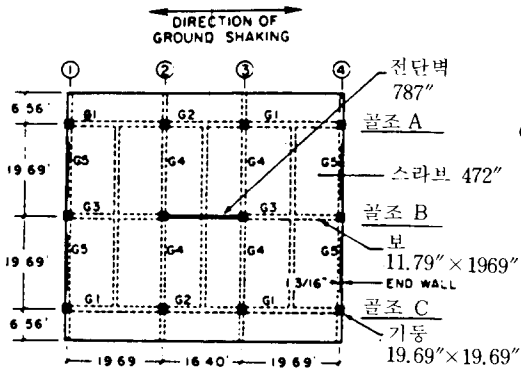


그림4(a) 평면 및 입면

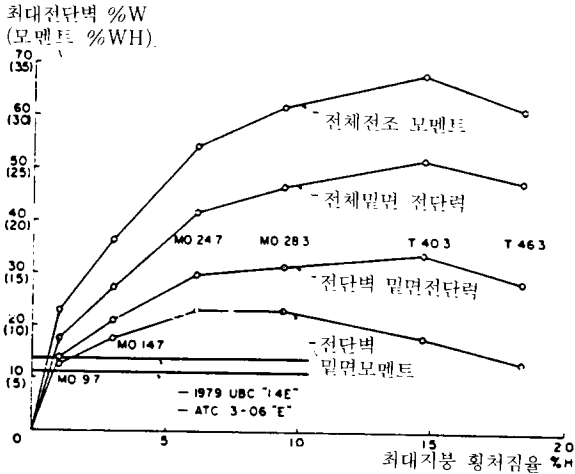


그림4(b) 최대 밀면전단력과 밀면 전도모멘트를 전체구조물의 최대지붕 횡처짐율과 관련하여 나타낸 그래프.

그림4. U.S-Japan 철근콘크리트 구조 실험체의 최소규준강도와 실제 구조물의 강도와 비교

사용될 경우 R_u 는 T 가 0.9초 일때까지 약 1.6이 될 것이다.

결론적으로 이 R_u 값과 ATC가 제안한 R 값(이중 골조인 경우 8)을 비교할 때, 분명히 ATC가 요구하는 최소초기항복강도만을 보유하는 구조물을 설계하는 것은 결코 바람직하지 않다는 것이 명백해지게 된다. 다시 말해서 그림4(a)에 나타난 구조물에서 실제 구조물의 최대 강도는 ATC 최소설계 강도보다 약 $R/R_u = 8/1.6 = 5$ 배 높은 것으로 나타났다. 즉 낮은 설계강도에도 불구하고 높은 중국 국한강

도를 보유하고 있다는 사실이 이 구조물로 하여금 극심한 지진에 견디게 한 주요인이었음을 보여주고 있는 것이다.

註: 그림4(b)에서 MO9.7은 Miyagi-Oki 지진과의 최대가속도를 9.7%로 조정하여 진동대에 적용한 것을 뜻하며 마찬가지로 T40.3은 Taft 지진과의 최대가속도를 40.3%로 조정한 것을 의미한다.

5. 고유주기 결정방법의 신뢰성

고유주기의 예측에는 경험식과 구조물의 기계적 특성을 고려한 해석적 방법이 사용되고 있다. 이러한 방법들에는 각기 나름대로의 불확실성을 내포하고 있으며 특히 Modeling과정에서 간막이벽등 비구조재의 역할을 무시할 경우 매우 현실과 동떨어진 고유주기 값을 얻을 수 있다.

또한 그림5에 나타나 있듯이 고유주기 $T=0.48$ 초로 설계된 구조물이 초기는 0.43초 그리고 일련의 서비스 수준의 지진시험후에는 0.61초로 증가했다가 다시 중국강도까지의 실험후에는 1.16초로 변했다. 이 실험결과에 의하면, 내진설계시 단일 고유주기 하나에 대해서만 지진력을 산출할 것이 아니라, 고유주기 산출에 수반되는 불확실성을 고려하여 어떤 일정한 범위의 고유주기를 정하고 이 범위내의 고유주기에 대하여 가장 높은 지진력을 설계값으로 삼는 것이 더 합리적인 방법이라고

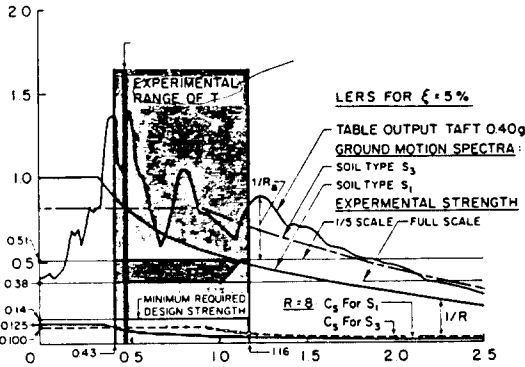


그림5. 진동대 입력 지진동, Taft 0.40g에 대한 5% 감쇠 LERS 와 ATC 5% 감쇠 LEDRS 및 측정된 실험체의 강도와와의 비교

여겨진다.

6. 결론

지진계수 C_s 값을 구하기 위해 주로 3가지의 변수가 결정되어야 함을 언급하였다. 즉 건물이 세워질 대지에 대한 LEDRS, 그리고 LEDRS에서 IDRS를 도출키 위해 적용하는 감소계수 R , 마지막으로 건물의 기본고유 주기의 결정이 그것이다.

최근 일어난 멕시코 및 칠레지진(1985)은 ATC가 제시한 LEDRS 보다 고유주기 T 의 범위에 따라 훨씬 상회하는 최대 응답치를 보여주고 있으며 지진가속도와 응답가속도 사이의 증폭비(Amplification Ratio)도 ATC의 2.5보다 훨씬 큰 값이었다.

일반적으로 규준에 의해 설계된 구조물은 그 규준이 최소설계 강도로 제시한 강도보다 몇 배 높은 실제 강도를 보유함으로써 높은 R 값의 적용에 따른 높은 연성비(ductility)의 요구를 완화시켜주고 있다. 이 초과강도(Overstrength)를 감안할때 실제 작용되는 연성비에 의한 감소계수는 2미만의 값으로 보인다. 따라서 실제 구조물의 극한강도(Ultimate Strength)가 규준에서 요구되는 최소 강

도와 같게 설계하는 것은 그만큼 높은 연성비의 보장을 요구함과 동시에 심각한 층간변위(Interstory Drift)를 초래함으로써 바람직하지 않은 설계방향이 될 것이다. 그리고, 가능하다면 규준에 의해 설계된 구조물이라 할지라도 그 종국 붕괴하중(Ultimate Collapse Load)을 한계해석법에 의해 알아내서 최소 설계 하중과 비교하여 충분한 안전률이 확보되어 있는지 확인해 둘 필요가 있다고 본다.

끝으로 건물의 기본주기는, 특히 철근콘크리트 구조물의 경우, 균열의 발생과 손상의 누적량에 따라서 큰 범위의 값을 가지게 된다. 따라서 예측 방법의 불확실성을 고려함과 더불어, 단일값을 사용하기 보다 어떤 범위내의 T 값을 모두 적용하여 가장 지배적인 경우의 지진력을 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- Bertero, V.V., "Lessons Learned From Recent Earthquakes and Research and Implications For Earthquake-Resistant Design of Building Structures in United States." Papers, Workshop on Earthquake Engineering, U.C. Berkeley, California, July, 1987.
- SEAOC Seismology Committee, "Tentative Lateral Force Requirements", Structural Engineering Assosiation of California, San Francisco, California, October 1985.
- Applied Technology Council, "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," NSF Publication 78-8, NBS Special Publication 510, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., June 1978.
- Rosenblueth, E. and Meli, R., "The 1985 Earthquakes Causes and Effects in Mexico city." Concrete International, ACI, Vol 8. No. 5, pp. 2-34 May 1986.