

강지진시 손상과정을 고려한 구조물 취약성 평가

Assessment of Seismic Structural Vulnerability as a Low-Cycle-Fatigue Process



최 동 호*



이 상 훈**

본 기사는 제11차 유럽지진공학 학술회의 발표논문 가운데 지진발생시 손상과정을 고려한 구조물의 취약성판단에 관한 기사(Kratzig and Meskouris)를 발췌 및 정리한 것이다. 본 기사의 요지는 다음과 같다.

유럽의 내진규정은 지진동을 받는 구조물을 일반적으로 허용응력 또는 강도-저항 개념에 따라 설계하도록 명시하고 있다.

실제로, 강지진동은 적은 횟수의 반복작용(low-cycle)만으로도 구조물의 손상(피로)을 유발시키며, 이러한 과정은 적절한 손상변수들을 사용하여 다루어질 수 있다. 특히 거동에 근거한 지진설계시 적절한 손상변수들은 필수적인 제어요소가 된다. 본 논문에서는 철근콘크리트 분야의 손상 제어지진 분석기술(damage controlled seismic verifi-

cation technique)에 대하여 기술한다. 과도한 응력 또는 강도-저항 개념 대신에 허용범위 내의 손상 또는 소산된 에너지(dissipated energy)를 측정하여 사용하는 내용이 포함된다.

1. 서 론

근본적으로 구조동역학의 해석개념은 선형-탄성을 기본으로 하고 있으며, 비선형 응답스펙트럼에서 조차도 연성도 μ 가 선형적으로 계산된 응답스펙트럼의 크기를 감소시키는 역할만을 한다는 점에서 그대로 적용되고 있다. 대부분 선형계에 대한 동적 구조물 응답은 낮은 응력수준만을 고려하므로 충분히 정확한 방법을 제공하지만, 구조물의 지진에 의한 손상 과정은 이와 반대로 다음과 같은 특성을 보인다.

* 성희원·한양대학교 도시환경건설공학과군 토목공학과, 조교수

** 한국전력기술주식회사 토목구조기술처, 책임연구원

- 심각한 비선형성 거동
- 극히 적은 횡수의 반복작용만으로 파괴
- 높은 비선형 에너지 소산
- 흔히 대규모 변형으로 이어짐

이러한 과정이 너무 복잡하지 않으면서도 충분한 정확성을 유지할 수 있는 방법이 추구되었다. Capacity design (Bachmann 1995, Pauley 1992)은 위에 언급된 문제점들을 해결했다는 평을 듣기도 하지만 다음과 같은 의문점을 여전히 남겨놓고 있다.

- 구조물 설계시 가장 적절한 소성 메카니즘
- 고려 대상이 충분한 연성을 갖는 정량적 범위

현대적이고 손상중심의 구조메카니즘에서 볼 때 두 의문점은 특정 설계지진에 대해서 구조물의 손상이 제어되고, 이때 요구되는 소산에너지를 확인하는 문제로 다시 설명될 수 있다.

본 논문은 연구뿐만 아니라 엔지니어링 실무의 수준에서 두 의문점에 대한 해답을 찾고 그 결과를 보이고자 한다.

2. 연성의 정의

연성은 내진설계기술에서 대단히 평범한 용어이다. 연성은 탄성한계의 변형에 대한 전체 탄소성 변형의 관계로 정의된다. 이상적인 상황에서 연성은 선형-탄성과 완전한 소성응답으로 정의되지만, 실제 재료 또는 상이한 구조적 위치로 인하여 응답곡선은 곡선 및 선형으로 나타나며, 탄성범위의 한계를 정하는 일은 상당한 어려움이 수반된다. 더우기 상이한 단면, 부재 또는 완전한 구조물에서도 같은 연성을 갖는 재질에서조차 μ 값은 달라진다.

심지어 선형 설계기준에서 연성의 취급기준은 더욱 막연함을 불러일으킨다. 이미 탄성력으로 가정한 상태에서 해당 설계력은 유로코드 (EC8)의 거동계수 q 또는 비선형 응답개념의 감소계수 α_n 를 사용해서 정의된다. 그러나 이러한 계수들이 어떻게 결정되고 실제 비선형 응답특성과 어떠한 관계를 갖는지는 의문이다. 만일 선형과 비선형 내부에너지가 같다고 가정하면, 구조적 저항성이 지나치게 커지게 되며, 다른 한편으로

선형과 비선형 변형이 같다고 가정하면 내부에 저장되는 에너지는 비현실적으로 크게 계산된다. 이러한 판단은 실제 철근콘크리트 단면에 대한 연성을 평가할 때 더욱 어려워진다. 이제 연성은 전문적인 엔지니어링 집단에서만 인정되는 지진 손상 파라메타로 남은 것처럼 보인다.

3. 현재의 경험적 지진 손상 파라메타

그러나 지진 손상의 척도로 연성을 이용하는데 반대하는 주된 원인은 지진이 작용할 때 보이는 히스테레시스 (hysteresis) 특성에 있다. 지진은 구조물에 히스테레시스 거동을 유발하고 심각한 비선형 거동을 수반하면서 비교적 적은 횡수의 반복운동에서 파손을 유도한다. 이러한 과정에서 그림 1의 상단에 반복된 것과 같은 최대 연성은 분명 단면 손상을 나타내는데 가장 적절한 척도는 아니다.

최근 조사한 바에 의하면 (Kratzig 1996, Spacone 1992) 히스테레시스 과정에 대한 기초개념을 확장하려는 많은 시도가 이루어졌다. 여기서는 그림 1에서 정의된 단순 반복 연성 (cyclic ductility)이나 누적 연성 (cumulative ductility)

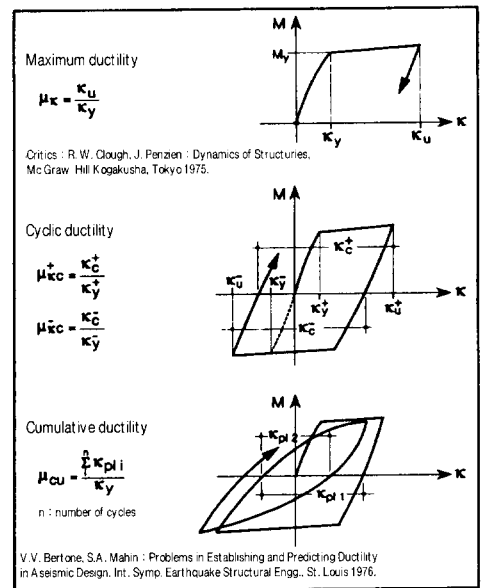


그림 1 기준 손상척도 1

과 같이 보다 전통적 개념의 손상척도 (damage indicator)에 대해서 자세히 알아본다. 이 두 방법은 실험에서 밝혀진 것과 같이 실제 구조물의 거동을 제대로 나타내지 못한다. 그림 2의 강도 연성 (stiffness ductility)은 특정 범위까지 단면 손상과정을 보여주는 강도저하를 모델링하는 것이 가능하며, 수정된 휨손상비 (Modified Flexural Damage Ratio) 뿐만 아니라 정규화된 소산에너지 (Normalized Dissipated Energy) 모델은 변형 에너지에 의해 단면 손상을 구하려 했지만 이 또한 실험을 통해 상관성이 낮다는 사실을 알았다.

지진공학에서 지진손상을 나타내는 것은 물리적으로 해결되지 않는 문제인 것으로 생각되기 때문에 사실 여러 가지 방법이 시도될 수 있다. 이때 흔히 사용되는 손상 파라메타는 그림 2 상단의 (Lybas 1977) 시스템 연약 지표 (system softening index)를 변형하는 것이다.

기본 원리는 구조물의 최초 고유주기를 변형하여 나타내는 진형적인 전체 강도 파라메타 (global stiffness parameter) K에 있다. 이 경험적인 손상 파라메타는 실제 구조물에서 판별이 용이한 것이 장점이며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$D = \frac{K_m - K_o}{K_f - K_o}$$

K_m 은 최대 변위에서의 구조 강도를 의미한다. K_o 는 파손시 (대표적으로 단조 지진하중상태, 참조 (Meskouris 1991) 설계강도이다. 그리고 K_f 는 하중재하전의 강도이다.

마지막으로 언급된 손상 파라메타는 복합 Park-Ang 모델이다 (Park 1985).

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_f} + \beta \frac{E_T}{F_y \delta_f}$$

여기서, δ_m 응답과 최대 설계변위를 발생하는 응답 δ_f , 그리고 E_T 는 전체 소산 에너지, β 는 실험에 의해 확인 가능한 무차원 파라메타이다.

4. 비선형 지진손상 시뮬레이션

보다 실용적인 손상척도를 제시하기 전에 여기서는 설계규모 개념과 연계될 수 있는 현대적인 비선형 손상 시뮬레이션 기법을 제시하며, 이때 가정된 소성메카니즘은 이미 입증되고 손상 누적 과정도 허용될 수 있는 것으로 인정한다 (Meskouris 1991). 이러한 결점사항에도 불구하고 최대 연성을 시뮬레이션에서 이를 기본으로 하는 이유는 비선형 계산이 간단하고 엔지니어링 실무에 쉽게 적용할 수 있기 때문이다.

모든 확인된 위험단면에 대하여 전체구조물의 연성능력을 먼저 계산하지만 (그림 3), 미리 선정된 단면에 국한된다. 그리고 주어진 지진에 대하여 요구되는 연성값을 찾는다 (그림 4). 구조물은 강도저하와 지진손상 형성과정이 정해져 있으므로 주어진 조건을 만족하는 수준으로 모델링 되어야 한다.

이러한 과정은 탄소성단 스프링 (elasto-plastic end spring)을 포함한 탄성 보요소에 대하여 개별적으로 적용될 수 있으며, 비선형 거동은 Takeda 방법 (Takeda 1970)에 따르는 것으로 본다.

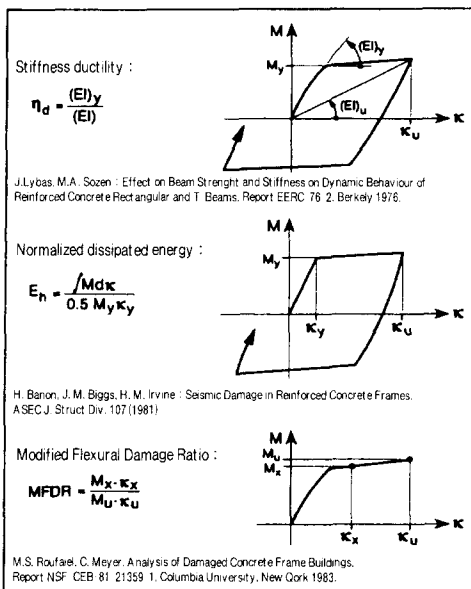


그림 2 기존 손상척도

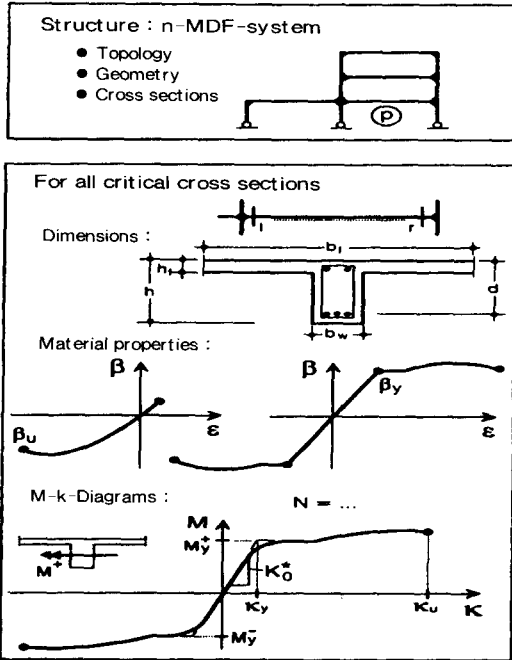


그림 3 제공되는 연성도 산정(Mahin 1977, Mesko-uris 1988, Kratig 1944)

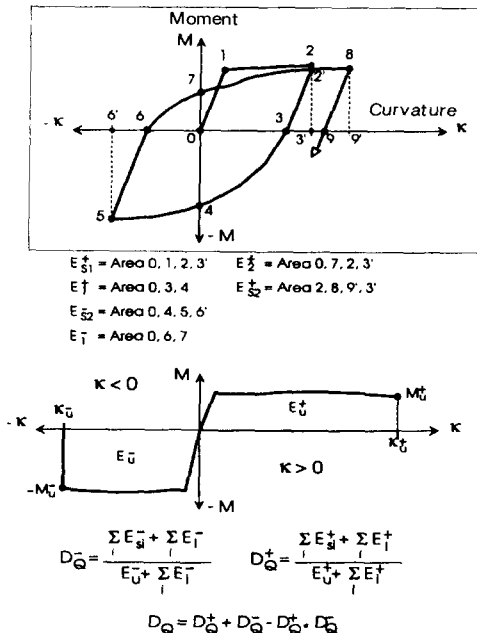


그림 4 요구되는 연성도 산정(Meskouris 1988, Otani 1974, Allahabadi 1988)

마지막으로 그림 4에서와 같이 연성 확보량과 요구량을 비교하여 구조물의 안전을 판단한다.

5. 제안 : 새로운 손상척도

콘크리트구조물의 강도를 모델링하는데 보다 사실적이고 향상된 개념을 적용하기 위해서 휨, 전단, 압축을 받는 콘크리트 부재의 손상 누적과정을 더욱 심도있게 고찰하여 보다 정확한 지진 손상척도를 제시할 필요가 있다.

이러한 척도는 모든 변수들이 물리적인 손상과정에 대응할 수 있어야 하며, 반복 손상을 가능한 정확히 나타내 주어야 함은 물론이다. 손상척도의 수치적 범위는 0(초기상태)에서 1(파손)로 정규화되며, 하중이력과는 무관해야 한다. 다음 두 항목은 의미 있는 손상척도를 제공하기 위하여 유념해야할 사항이다.

- 어떠한 물리적 속성이 응답 이력과 손상축적과정 효과 모두를 반영할 수 있는가?

- 반복 손상 효과가 궁극적인 파괴 모드에 대하여 어떻게 표준화 될 수 있는가?

첫 번째 질문에 대하여 비선형 과정에서 항상 양이며 손상이 진행과 병행하여 누적되는 소산에너지를 상기해본다. 에너지 소산은 경로에 절대 좌우되고 균열-손상의 형성과 관계있다는 사실이 실험을 통하여 설명되었다. 또한, 반복하중시 파괴모드는 단조증가 하중시의 파괴모드와 유사하다는 것이 실험을 통하여 입증되기도 하였다 (Muller 1983).

여기서 제시된 손상척도는 소산된 에너지만을 기준으로 한다. 이 모델은 그림 4에 보인 바와 같이 단면과 부재수준을 결정해 나간다. 1988년 Meyer에 의해서 처음 제시된 이 모델은 1차반주기(primary half-cycle, 새롭게 전개되는 균열에 대한 균열에너지)와 2차반주기(secondary half-cycle, 기존 균열의 이동에 대한 마찰에너지)로 구성된다. D_0 척도는 표준계수로서 단조 하중을 받아 파괴 도달시 최대 에너지 E_{in} 를 포함한 모든 소산에너지가 누적된다. 흡수에너지는 E_u 와

E_i 로 구분되며, 이들의 물리적 의미는 다음에 도입되는 1차반주기(PHC, primary half-cycle)과 후행반주기(FHC, follower half-cycle)로 설명된다. 1차반주기는 최대진폭에 해당하는 반주기의 명칭이며, 뒤따라 이와 유사한 진폭을 보이는 반주기를 후행 반주기라 한다.

1차반주기 PHC 에 해당하는 어떠한 최대변형 v_i 가 초과될 때마다 새로운 1차반주기 PHC_{i+1} 이 정립된다. 모든 PHC 는 일정한 손상정도에 대응한다.

최초 에너지부분 E_w 는 PHC 동안 소산된 에너지에 속하고, 제2에너지 부분 E_i 는 FHC 동안 소산된 에너지에 속한다. 수학적으로 D_Q 는 다음과 같은 매개변수 D_Q^+ 와 D_Q^- 의 도움으로 표현될 수 있다.

$$D_Q^+ = \frac{\sum E_{si}^+ + \sum E_{fi}^+}{E_w^+ + \sum E_{fi}^+} \text{ 양의 변형인 경우} \quad (1a)$$

$$D_Q^- = \frac{\sum E_{si}^- + \sum E_{fi}^-}{E_w^- + \sum E_{fi}^-} \text{ 음의 변형인 경우} \quad (1b)$$

여기서,

i : 반복횟수

E_w^+, E_w^- : 양과 부의 변형에 대한 표준계수 (normalizing factors)

결과적으로 다음과 같이 정의한다.

$$D_Q = D_Q^+(1 - D_Q^-) + D_Q^- \quad (\text{양의 변형에 대하여}) \quad (2a)$$

$$D_Q = D_Q^-(1 - D_Q^+) + D_Q^+ \quad (\text{음의 변형에 대하여}) \quad (2b)$$

D_Q 의 수치적 산정은 그림 4의 예제를 통해서 설명되고 있으며, 본 손상 모델의 특성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 파괴시까지 단조 하중에 흡수된 에너지는 반복하중의 경우 일정한 수의 PHC 에 의해서 제공되어야 한다. 이 에너지 양은 주로 강재의 균열

해방 및 긴장에 의한다.

- 주로 균열의 마찰에 기인한 FHC 에 의해 흡수된 에너지는 손상척도의 증가에 비교적 작게 반영된다.

손상척도는 반복과정을 거치는 동안 실험을 시뮬레이션한 지진손상 전개과정을 나타낸 그림 5, 그림 6과 같이 0에서 1까지 누적된다. 한편, 컴퓨터 시뮬레이션에 앞서 실험이 이루어졌는데, 측정 및 계산된 손상누적 결과는 그림 6에서처럼 훌륭하게 일치하였다.

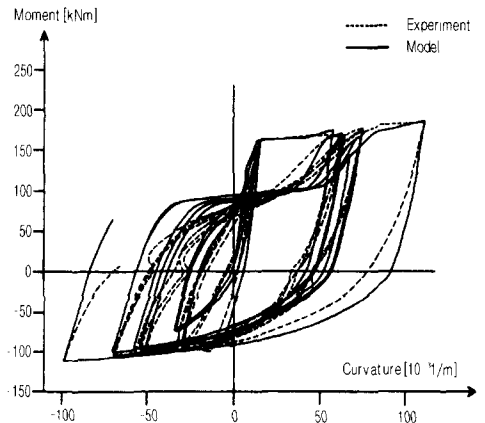


그림 5 실험에 사용된 보(Berkeley 1976)의 모멘트-곡률관계

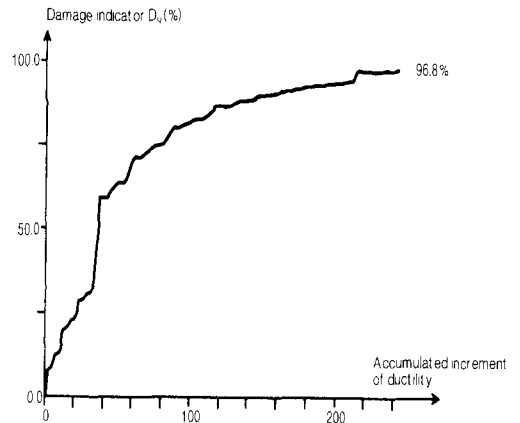


그림 6 실험에 사용된 보(Berkeley 1976)의 손상척도 D_Q

6. 실험적 증명

위에서 설명된 손상척도는 문헌의 실험결과 뿐만 아니라 자체 실험에서도 주의 깊게 확인되었다. 여러 실험 가운데 Ruhr-University에서 새로운 손상척도를 증명하기 위하여 기둥에 대한 실험을 수행하였다. 기둥에 축방향으로 작용하는 수직력 ($N=300kN$)은 $1000kN$ 실린더를 통해 재하되었다. 수평력 P 는 $630kN$ 실린더를 통해 점진적으로 정현과폭선과 같이 재하되었다. 여러 시험들은 이론적인 손상모델을 증명하기 위해서 다른 손상수준 ($D_0=40\%, 60\%, 80\%, 90\%, 98\% 100\%$)에서 정지되었다. 또 다른 기둥은 항상 정적인 하중하에서 파괴 될 때까지 정규화된 계수인 E_b 를 측정하기 위해 재하되었다.

수치적으로 D_0 에 의해 묘사된 손상진전과 실험에 의한 손상진전이 잘 일치함을 보이기 위해 축방향으로 미리 재하된 정방형 단면을 갖고 있는 기둥의 실험 기록을 그림 7에서 보여 주고 있다. 보강재가 좌굴되기 시작할 때 D_0 의 값은 99%이다. 파괴는 예상했던 것처럼 $D_0=100\%$ 에서 발생되었다. 이 상태에서 기초부분은 전반적으로 파괴되었고, 보강재 또한 심하게 좌굴되었다.

손상척도 D_0 는 Ruhr-University에서 지난 15년간 대형 시험편과 컴퓨터 시뮬레이션을 동시에 수행하여 개발되었다(Kratzig 1996b, Meyer 1988a). 시뮬레이션은 전단과파괴 모드가 예상되는

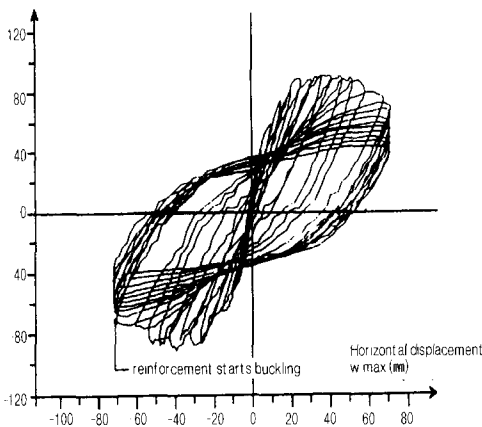


그림 7 반복하중에 의한 QSS시험편의 강도저하

얇은 판의 반복 비선형 모델을 기본으로 하고 있으며, 비선형 구조해석 역시 병행하고 있다.

7. 결 론

연성은 철근콘크리트 구조물의 경우 지진손상을 시뮬레이션하기에는 다소 막연한 척도로 인식되어 왔다. 본 실험을 통하여 비손상 개념으로는 지진손상을 적절하게 재현할 수 없었다. 강도저하를 기본으로 한 모델은 초기 손상단계의 변동에 민감한 반면 파괴 단계에서는 거의 변동을 보이지 않는다. 다른 한편, 에너지를 기본으로 한 변수들은 지진손상을 과대평가하는 경향을 보인다. Park-Ang 모델은 두 방법을 조합하려 하였으나, 실제 손상을 묘사하는데는 적합한 수준에 못 미치고 있다.

결과적으로 보다 현실적인 손상척도는 비용을 수반한 연구를 요하며, 지진설계과정에 적용하기까지는 복잡하고도 상당한 시간을 필요로 한다. 미래에는 비선형 지진을 입증하는데 최대 또는 반복연성값이 손상의 척도가 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Allahabadi, R., G. H. Powell, DRAIN -2DX User Guide, Report EERC-88/06, UCB Berkeley, 1998
2. Bachmann, H. Erdbebensicherung von Bauwerken, Basel : Birkhauser, 1995
3. Garstka, B. Investigations on Resistance and Damage Behavior of Reinforced Concrete Beam Elements Considering Shear Effects under Cyclic Nonlinear Action, Techn. Rep. No. 93-2, Inst. f. Struct. Engg., University of Bochum, 1993
4. Kratzig, W. B., Meskouris, K., Seismic damage evaluation treated as a low-cycle-fatigue process. In P. Fajfar et al. (eds), Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, 139-149, Rotterdam : Balkema, 1997
5. Kratzig, W. B., Meskouris, U. Hanskotter, Ni-

- chtlineare Berechnung von Stahlbeton-Rahmentragwerken nach dem Fließgelenkverfahren (ec Zint). Bau technik 71, 1994, pp. 767~755
6. Kratzig, W. B. & Niemann, H.-J., Dynamics of Civil Engineering Structures. Rotterdam/Brookfield : A.A. Balkema, 1996a
 7. Kratzig, W.B. Seismic damage simulation: A low-cycle fatigue process. In G. Augusti, C. Borri & P. Spinelli (eds), Structural Dynamics, 15-22. Rotterdam/Brookfield : A.A. Balkema, 1996b
 8. Kratzig, W. B., C. Konke & Y. Basar, Multi-Scale Modelling of Damage Processes in Shell Structures, In S.A. Atluri et al. (eds), Computational Mechanics '95, 1934-1939. Berlin : Springer, 1995
 9. Lybas, J., Sozen, M. A., Effect of Beam Strength and Stiffness on Dynamic Behavior of RC Coupled Walls, Report SRS 444. Urbana : University of Illinois, 1977
 10. Mahin, S. A., V. V. Bertone., RCCOLA-A Computer Program for R.C. Column Analysis, User's Manual and Documentation, Dept. Civ. Engg., UCB, Berkeley, 1977
 11. Meskouris, K. & W. B. Kratzig, Seismic Damage Assessment of Buildings. In S. Savidis (ed), ERCAD 1989 : 427-441. Rotterdam : Balkema, 1991
 12. Meskouris, K., W.B. Kratzig, A. Elenas, L. Heiny, I. F. Meyer, Mikrocomputerunterstützte Erdbebenuntersuchung von Tragwerken (NILDYN). Wiss. Mitteil. SFB 151, Heft 8, RU Bochum, 1988
 13. Meskouris, K., W. B. Kratzig, A. Elenas, L. Heiny, Mikrocomputerunterstützte Erdbebenuntersuchung von Tragwerken (ZNSQ). Wiss. Mitteil. SFB 151, Heft 8, RU Bochum, 1988
 14. Meyer, I. F., Ein werstoffgerechtes Schadigungsmodell und Stababschnittselement für Stahlbeton unter zyklischer nichtlinearer Beanspruchung. Techn. Report No. 88-4, Inst. f. Struct. Engg., University of Bochum, 1988a
 15. Meyer, I. F., W. B. Kratzig & F. Stangenberg., Damage prediction in reinforced concrete frames under seismic action. EEE-European Earthquake Engineering 3, 1988b, pp. 9~15
 16. Muller, F. P., Keintzel, E. & Charlier, H., Dynamische Probleme im Stahlbetonbau. Berlin : Deutscher Ausschluß für Stahlbetonbau, Heft 342, 1983
 17. Otes, A., Zur werkstoffgerechten Berechnung der Erdbebenbeanspruchung in Stahlbetontragwerken. Techn, Report No. 25, Inst. f. Reinforced Concrete, TH Darmstadt, 1985
 18. Otani, S., SAKE-A Computer Program for Inelastic Response of RC Frames to Earthquakes. SRS Nr. 413, University of Illinois, Urbana, 1974
 19. Park, Y. J., Ang, A. H.-S., Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. Journ. Struct. Engg., ASCE, 111, 1985, pp. 722~739
 20. Pauley, T. & M. J. N. Priestle, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, New York : Wiley, 1992
 21. Spacone, E., V. Ciampi & F. C. Filippou, A beam element for seismic damage analysis, Report No. UCB/EERC-92/07, College of Engineering, University of California at Berkeley, 1992
 22. Takeda, T., A. Sozen & N. N. Nielse, Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, ASCE, J. Struct. Div. 96, 1970, pp.2557~2573
 23. Taylor, A. W., Stone, W. C., Kunnath, S. K., Performance-Based Specifications for the Seismic Design, Retrofit and Repair of RC Bridge Columns, NCEER-Bulletin, Vol. 11, No.1, 1997, pp.6~11 