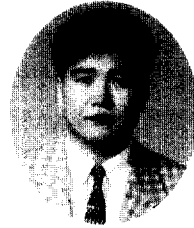


### 철근 콘크리트 구조물의 지진응답해석

### Seismic Response Analysis for Reinforced Concrete Structures



송 하 원\*



前 川 宏 一\*\*

#### 1. 서 론

철근 콘크리트(이하 RC)구조물에 많은 피해를 입힌 고베 지진 이후 수많은 조사와 연구가 이루어져 왔다. 그 결과 철근의 배치와 정착 등의 RC구조 세목문제 이외에도 사용된 내진 설계기준이 실제 지진력보다 훨씬 작은 지진력만을 상정한 것, 콘크리트단면이 받을 수 있는 전단력을 과대 평가한 것, 취성 파괴에 대한 배려가 부족했던 것이 RC구조물 피해의 주요 원인으로 밝혀졌다.<sup>1) 2)</sup>

RC구조물의 적절한 모델링에 의한 동적 비선형해석은 RC구조물의 피해상황과 내하성상으로부터 적용된 지진 외력을 역산할 수 있으며 이 지진력은 내진 설계에 사용되는 지진력 상정에 유용하게 사용될 수 있다. 또한 구조물이 보유해야만 하는 내진 성능을 적절하게 정하는 것은 합리적인 내진 설계에 매우 중요하다. 최근 각국의 시방서는 동적 해석에 의한 내진 성능평가를 의무화하는 방향으로 개정되어 나

가고 있다.<sup>3) 6) 7)</sup>

재현주기가 강한 지진에 대해서 지진이 작용하는 동안이나 지진발생 후에도 구조물은 안전성을 유지하여야 하는 것이 내진 설계의 기본원칙이다.<sup>8)</sup> 따라서 RC구조물의 일부 부재에 비탄성을 고려하며 지진에너지를 흡수하고 소산시킬 수 있는 충분한 연성을 갖도록 설계하는 것은 매우 중요하다. 또한 일반적인 내진 설계가 이루어진 RC구조물에 대하여도 지진응답해석을 실시하여 취성 파괴나 극심한 소성 변형을 일으킬 수 있는 부재에 대해서는 상세설계가 이루어져야 한다. 이를 위해 손상이나 비탄성을 고려한 실제 RC구조물의 지진응답해석은 매우 중요하다.

본고에서는 먼저 내진 설계에 필요한 지진단면력의 산정등에 사용될 수 있는 동적해석법을 알아본다. 또한 RC구조를 동적해석이 가능한 형태로 이산화하는 모델링기법을 설명하며 유한요소법에 의한 RC구조물의 동적 비선형해석 예를 통하여 내진 해석시 고려할 사항 등에 대하여 고찰한다.

\* 정회원, 연세대학교 토목공학과, 조교수

\*\* 일본, 동경대학교 토목공학과, 교수

## 2. 동적해석법

지진해석 방법에는 통상 정적해석법과 동적해석법이 있다. 대표적인 정적해석법인 등가정적해석법은 지진에 의한 하중을 등가의 정적 하중으로 전환한 후에 정적해석을 수행하는 방법이다.\* 이 방법은 동적 특성이 단순한 구조물의 지진해석에 많이 이용되어 왔다. 즉, 구조물의 형상이 단순하며 1차 진동모드가 탁월하여 고차모드를 무시할 수 있는 경우 정적해석으로 구조물의 지진에 대한 응답을 비교적 정확하게 해석할 수 있다. 그러나, 구조물이 복잡하고 지반조건이 특수한 경우나 중요한 구조물인 경우 상세한 지진검토토가 요구되므로 동적해석이 필요하다.\*\*

동적해석법은 대상구조물 또는 구조물과 지반을 모델링하여 지진입력데이터로써 지진파형 혹은 응답 스펙트럼을 입력하여 해석하는 방법이다.\* Fig. 1은 동적해석의 흐름도를 보여준다. 동적해석의 원리는 대상 진동계의 운동방정식의 해를 구하는 것으로 해를 구하는 방법에 따라 Fig. 1에서 보이는 것처럼 크게 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 응답 스펙트럼해석법
- 시가력 응답해석법
  - 시가력 모드해석법
  - 직접적분법
- 주파수 응답해석법

### 2.1 응답 스펙트럼해석법

응답 스펙트럼해석법은 선형 다 자유도 진동계의 지진응답이 각 진동모드를 중첩하여 얻어질 수 있다는 점을 이용하고 각 진동모드에서 최대 응답치를 스펙트럼곡선을 이용하여 구한 후 대상 진동계의 최대 응답치를 구하는 방법이다. 간단한 계산으로도 실시할 수 있어 실무에서 널리 사용되고 있다.

최대 응답치의 근사치를 얻는 방법으로서 각 모드에서의 응답치의 제곱의 합에 대한 평방근을 취하는 방법(SRSS : Square Root of Sum of Squares)이 사용되고 있다. 이 방법은 각기 다른 진동모드의 고유주기가 근접해 있는 경우 과도한 결과를 주는 경우가 있다. 이러한 결점을 보완한 방법으로서 완전 2차 결합법(CQC : Complete Quadratic Combination)의

적용을 생각할 수 있다. Fig. 2는 응답 스펙트럼해석법의 개략적인 해석개요이다.

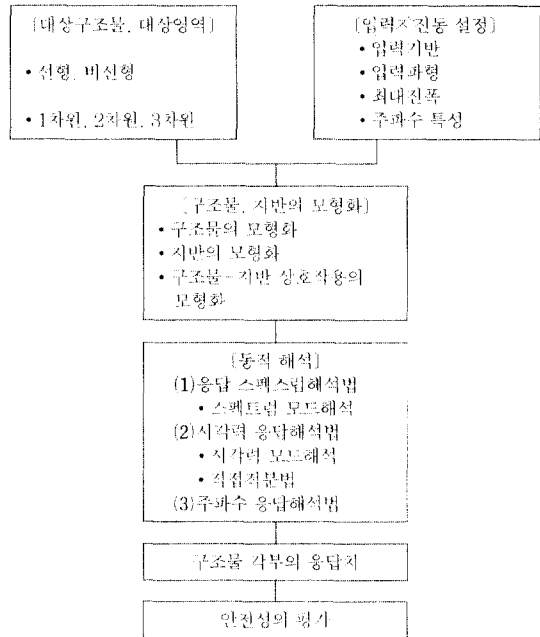


Fig. 1 Flow of dynamic analysis

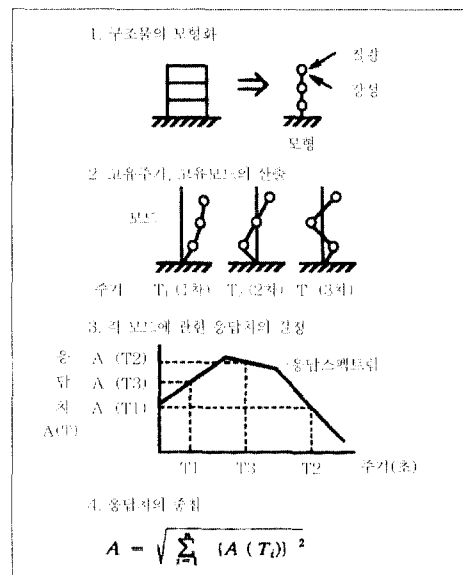


Fig. 2 Response spectrum analysis method

## 2.2 시각력 모드해석법

운동방정식에 사용되는 감쇄행렬을 비례감쇄로 표현할 수 있는 경우 모드의 직교조건을 사용하면 전체의 응답을 1자유도계 응답의 중첩으로써 표현할 수 있다. 이런 특성을 이용하여 각 모드에서 등가의 1질점계 모델의 시각력 응답을 Duhamel 적분법에 의해 계산하고 그 결과를 중첩시켜서 대상 진동계의 시각력 응답을 구하는 방법이다. Fig. 3은 시각력 모드해석법의 해석개요이다.

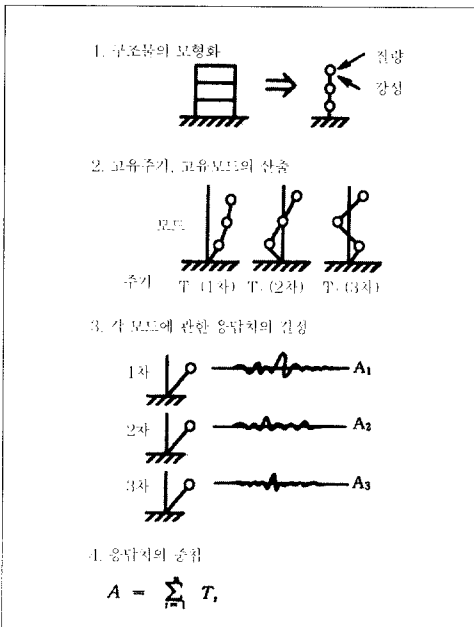


Fig. 3 Mode superposition method

## 2.3 직접적분법

이 방법은 진동계의 운동방정식을 시간별로 직접 수치적분하여 응답을 구하는 적분방법이다. 많이 사용되는 방법으로 다음과 같은 방법이 있다.

- Newton  $\beta$  법
- Wilson  $\theta$  법
- Runge - Kutta법
- 선형가속도법 등

직접적분법은 각 계산단계에서 강성행렬을 변화시키면서 계산이 가능하므로 비선형 진동에 대해서도

적용이 가능하다. 따라서 이 방법은 고차의 모드를 다수 포함하여 복잡한 진동특성을 나타내는 구조물이나 탄소성해석의 필요가 있는 구조물에 널리 사용된다. Fig. 4는 직접적분법의 개략적인 해석개요를 나타낸다.

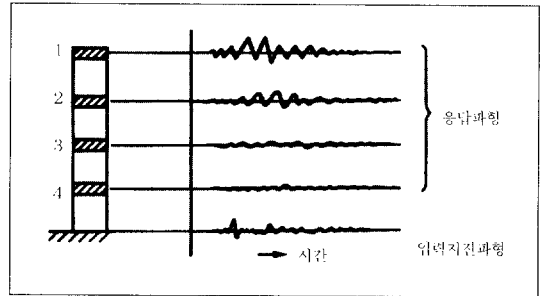


Fig. 4 Direct integration method

## 2.4 주파수 응답해석법

진동계의 운동방정식을 주파수영역에서 계산하여 구조물의 시각력응답을 구하는 방법이다. 시간영역에서 주파수영역으로의 변환 혹은 그 반대로의 변환에 일반적으로 고속 Fourier 변환(FFT : Fast Fourier Transformation)이 사용된다.

지반과 구조물의 상호작용을 고려한 지진응답해석을 수행하는 경우 지반스프링이 주파수에 의존하여 변화하는 복소수강성으로 표현되므로 이 방법에 의한 해석을 수행할 필요가 있다. Fig. 5는 주파수 응답해석법의 해석개요를 보여준다.

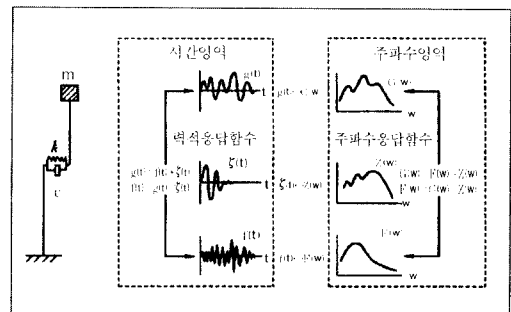


Fig. 5 Frequency response analysis

### 3. 철근 콘크리트 구조해석모델

RC구조의 해석모델링은 이산화정도와 범위에 따라서 다음과 같이 크게 분류할 수 있다.<sup>14)</sup>

- 재료수준의 모델링  
(point by point level)
- 부재수준의 모델링  
(member by member level)
- 단순 저 자유도 모델링  
(simple few degrees-of-freedom level)

#### 3.1 재료수준의 모델링

재료수준의 모델링은 일종의 연속체모델링으로서 RC구조물을 구성하는 콘크리트와 철근에 대해 각각 다른 요소를 사용한 후 RC구조물을 많은 수의 유한요소로 이산화하여 모델링하는 방법이다. 이 해석모델은 구조물의 모든 점이 응력과 변형률 이력을 따르도록 허용하며 기하학적 형상도 아주 세밀히 적용할 수 있다. 다축 하중하에서의 균열의 성장 및 균열면의 거동을 표현하면서 요소 크기에 의존하지 않는 유한요소를 사용한 RC의 구성모델에 관한 많은 연구 성과가 있었다.<sup>15)</sup> 그럼에도 불구하고 이러한 연속체모델링에서는 계산이나 기억용량에 대한 제한이 있어 의사 정적하중에 의한 해석이나 제한된 반복하중하에서 RC구조물중의 몇 개 부재의 조합에 대한 응답 해석정도의 해석에 국한되었다. 혹은 단조하중하의 전체 RC구조물의 응답해석정도에 머물렀다. 현재에도 비교적 소규모의 RC구조물의 동적해석에 이러한 재료수준의 모델링을 적용하려는 노력은 계속되고 있다. 그러나 전반적인 수치 안정성이나 실험으로 관찰된 거동을 재현하는데 있어서 이 모델링은 부재수준의 모델링이나 단순 저 자유도 모델링에 대한 우월성 확보측면에 있어서 그다지 성공적이지 못하였다.

#### 3.2 부재수준의 모델링

연속체모델링에 반하여 부재수준의 모델링은 한 개의 요소가 한 개의 보 혹은 한 개의 기둥 혹은 한 개의 전단벽을 대표하도록 하는 방법으로 비록 부재의 세밀한 기하학적 정보를 고려치는 못하나 중요한

부재거동은 표현할 수 있다. 또한 개개의 부재뿐만 아니라 부재의 길이에 따른 손상이나 비탄성 영향 등을 표현할 수 있다. 3차원 비선형 동적해석을 수행하는 경우에도 부재수준 모델링의 계산 요구 조건은 현재의 전산능력을 고려할 때 타당한 수준이며 부재수준 모델링은 RC의 비선형 동적응답해석의 주류를 이루어왔다.

#### 3.3 단순 저 자유도 모델링

단순 저 자유도 모델링은 RC구조물 전체를 단순히 몇 개의 요소로 모델링하는 방법이다. 예를 들어 RC고층구조물의 응답해석에서 전단-보 모델을 사용하여 한 개 층을 한 개의 요소로 모델링하는 방법이 이에 속한다. 비록 이 모델링기법을 사용하여 전체 거동에 있어서 가장 중요한 거동을 얻는데는 성공하였으나 이 모델은 정확한 구조적인 기하학적 형상과 각기 부재의 손상이나 비탄성 분포를 예측할 수 없는 단점이 있다. 따라서 지진력등과 같은 복잡한 하중이력에 대한 특정 구조물의 정확한 비선형 응답 예측을 할 수 없는 큰 단점이 있다. 또한 최근 전산능력의 진전은 복잡한 구조물의 단순한 2차원이나 3차원 단순 저 자유도 모델링에 큰 의미를 부여하지 못하게 하였다.

#### 3.4 파이버 모델

파이버 모델(fiber model)은 부재수준의 모델이면서 연속체 모델의 성격을 가미한 모델로서, 부재를 몇 개의 단면으로 나눈 뒤 각 단면의 대표적인 점들이 반응해석의 전 단계에 걸쳐서 주어진 응력-변형률 곡선을 따르도록 한 모델이다.<sup>16) 17)</sup> 파이버 모델에서 부재는 길이 방향으로 몇 개의 조각들로 나누어지며 각 단면에서는 유한개의 파이버 영역으로 나누어진다. Fig. 6은 파이버 모델의 이산화를 보여준다.

각 파이버의 기하학적 특성은 국부좌표 yz축에서의 파이버 면적  $dA$ 와 그 위치로 나타내지며 각 파이버는 콘크리트나 철근을 대표한다. 이 모델에서 콘크리트와 철근의 응력이력을 포함한 비선형 응력-변형률 관계식은 모델의 중요한 구성요소가 된다. 연속체

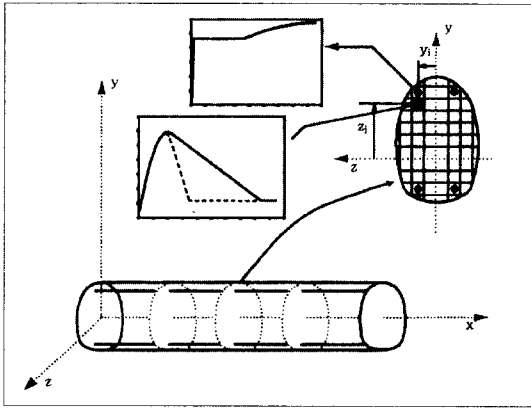


Fig. 6 Fiber model

모델의 장점과 부재모델의 장점을 가미한 모델로 최근의 전산 기술의 발달로 많은 제약이 극복되면서 RC구조물의 내진해석에 본격적으로 사용될 수 있는 모델이다. 최근 내진에 관한 시방서들이 비선형 동적 해석에 의한 내진 성능평가를 요구하는 방향으로 개정되어 가고 있다. 또한 고배지진 후에 단순화된 부재모델보다 반복하중하에서의 3차원적인 거동이 일관되게 반영되어야 한다는 점이 부각되었다. 이러한 시점에서 강한 지진에 대해 재래적인 선형해석에 근거한 내진설계보다 좀더 현실적인 비선형해석에 근거한 내진설계에 본 모델은 유용하게 이용될 수 있다.

#### 4. 동적 비선형 유한요소해석

3차원 연속체요소와 구성모델에 근거한 임의의 RC구조에 대해 동적 비선형해석에 의해 RC구조물의 내진 성능까지 평가하는 것은 가장 일반성을 갖고 있으며 RC구조에 대한 내진해석이 추구하는 한가지 목표이기도 하다. 그러나, 경우에 따라서 2차원 동적 해석만으로 RC구조물의 내진성능평가의 목적을 달성할 수 있는 경우가 많다. 예를 들어 RC연속체요소를 사용한 2차원 동적 비선형해석은 RC구조물의 휨변형의 비선형성뿐만 아니라 전단 파괴모드의 추적도 가능하게 하였다. 본 절에서는 RC구조물에 대한 2차원 동적비선형해석 예를 통하여 내진 동적해석에 고려되어야 할 사항을 소개한다.<sup>10)</sup>

동적 비선형 유한요소해석에 사용되는 RC구성식

은 균열이 분산되는 영역과 부재간의 국소변형이 탁월한 영역을 포함하며 여러 방향 균열에 대해 반복하중에 의한 균열의 개폐, 균열면의 응력전달, 균열 발생 위치에서의 철근의 소성과 소성영역의 확대 등이 고려되어야 한다. Fig. 7은 RC판에 순환반복전단력이 작용하는 경우의 해석 예로서 응답실험결과와의 비교로부터 해석이 내력과 변형을 정확히 예측함을 알 수 있다. 응답내부곡선의 정확한 예측은 구조물의 에너지 흡수 능력과 매우 깊은 관계가 있으므로 동적 해석에 특히 중요하다.

Fig. 8은 소형단주의 순환반복하중에 의한 거동을 보여준다. 기초로부터 철근이 뽑히는 현상과 기초와 기둥간의 전단변형이 기초자체의 변형과 비교해 볼 때 현저함을 알 수 있다. 해석과 실험 결과의 비교로부터 해석에서 철근부착 구성모델과 부재 접합면의 콘크리트 전단응력모델이 잘 적용되고 있음을 판단할 수 있다.

Fig. 9는 벽과 기둥과 보가 조합되어 이루어진 내진벽의 수평 반복순환하중에 대한 거동을 보여준다.

해석과 실험결과와의 비교로부터 RC판요소에 대한 구성식의 정도를 검증할 수 있다. 부재단면의 전

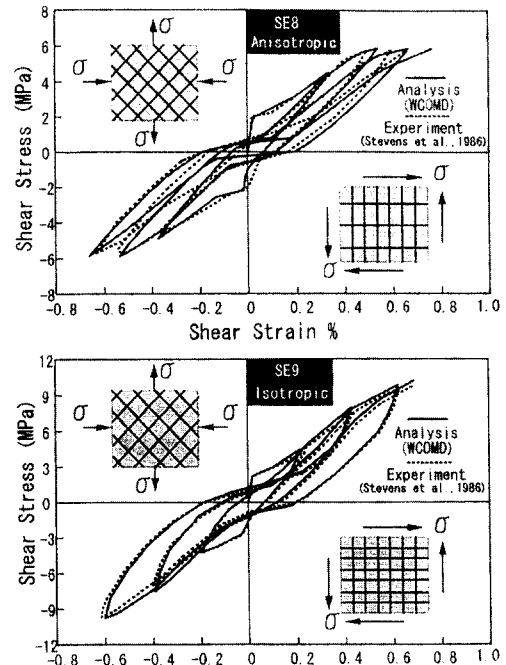


Fig. 7 RC plate element in plane shear under cyclic loading

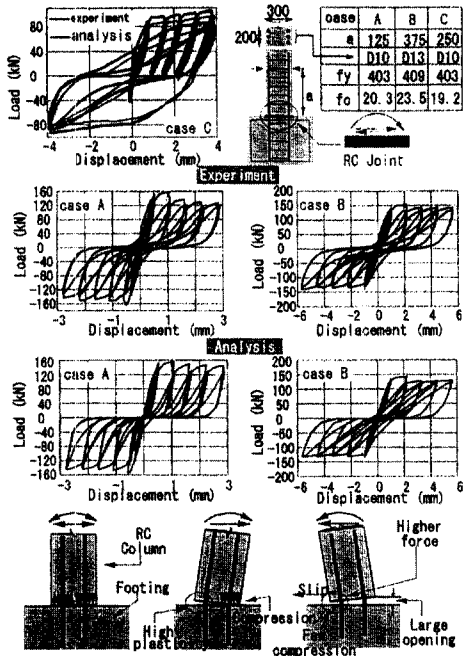


Fig. 8 Response of RC short column under horizontal cyclic loading

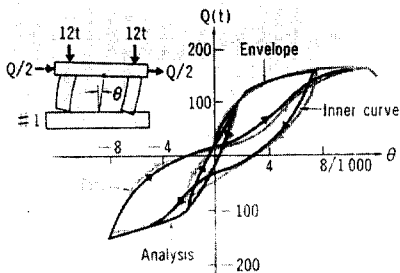


Fig. 9 RC earthquake resistance wall under horizontal cyclic loading

단강도는 크기효과가 있음이 실험적으로 잘 알려져 있다. 대규모의 RC구조물의 동적거동을 해석하는 경우 이러한 크기효과를 올바르게 해석할 수 있는 능력을 포함하는 것은 매우 중요하다. 또한 RC내진벽에 수평가속도가 작용하는 경우 수평관성력뿐만 아니라 연직·회전관성력이 발생하며 연직·회전관성력이 수평복원력 특성에도 영향을 끼치는 복잡한 연성작용을 나타낸다. Fig. 10은 RC내진벽의 해석에 의한 시각이력응답을 보여준다.

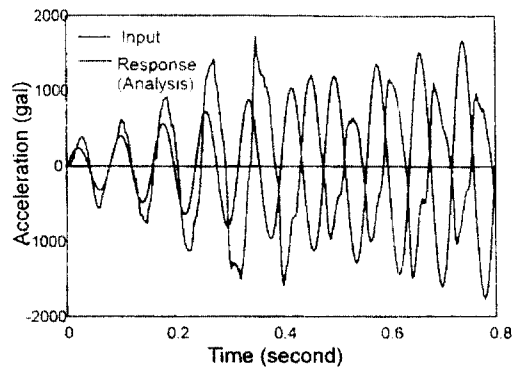
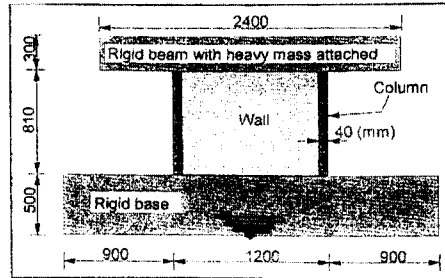


Fig. 10 Dynamic response analysis of RC earthquake resistance wall

Fig. 11은 해석으로부터 역산된 RC내진벽의 수평 방향의 동적이력특성을 보여준다. 정적해석과 동적 해석으로부터 내진벽의 정적작용과 동적작용에서의 복원력 특성이 각기 다를 수 있다. 정적작용에서는 내진벽에 연직하중이 발생하지 않으나 동적하중에서는 상하운동에 의한 관성력이 내진벽에 작용한다. 이로 인하여 주된 전단저항을 받는 내진벽의 응력상태가 변하여 결국 수평방향의 복원력 특성에 영향을 줄 수 있다. 이런 연성의 문제들 역시 동적해석에 고려되어야 한다.

반복하중에 의한 콘크리트 피복 탈락의 판정조건

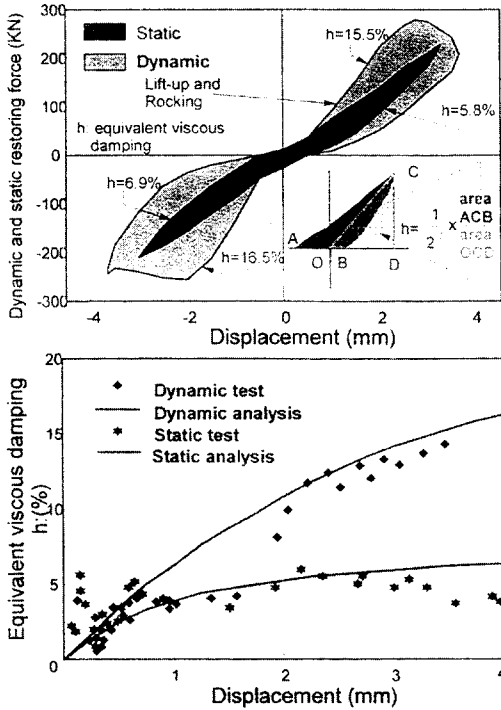


Fig. 11 Analysis of hysteresis characteristics of RC earthquake resistance wall

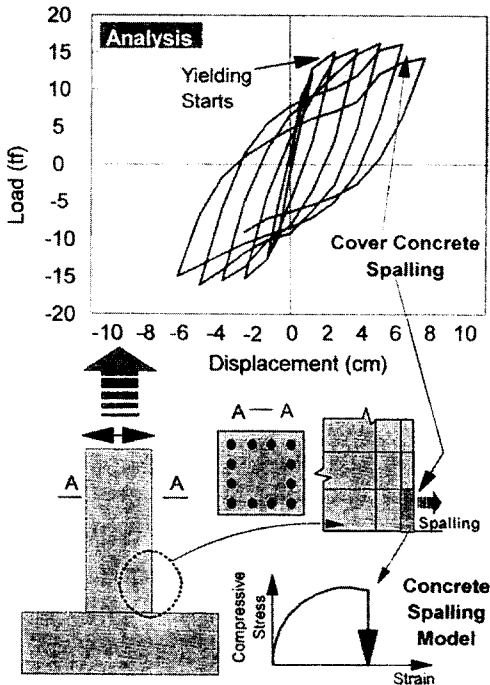


Fig. 12 Hysteresis characteristics of RC short column

과 탈락이후의 재료모델은 RC동적해석에 유용하게 사용될 수 있다. Fig. 12는 RC교각 해석에서 콘크리트 피복의 탈락을 고려한 RC단주의 이력특성해석을 보여준다.

## 5. 결 론

지진으로부터 인명과 재산 피해를 최소화할 수 있는 합리적인 내진설계를 위해 비선형 동적응답해석을 실시하여 RC구조물 또는 구성부재의 거동을 추적하고 내진 요구성능을 조사하는데 필요한 최대변형, 잔류변형, 파괴형태, 단면력, 응력 등의 정보를 얻는 것은 필수적이다.

지난 수십년간 RC구조물의 해석에서 "simulate RC behaviors as it is", "approach closer to the reality of RC"의 모토는 큰 바램이었다. 이러한 바램은 RC구조물의 지진응답해석에서도 역시 추구 되는 목표이다. 지진발생에서부터 지진 후에 이르기까지의 RC구조물의 동적 비선형응답해석에 사용되는 해석도구(tool)는 이러한 목표에 장애가 되는 어려움이었다. 그러나, 지금 이러한 어려움이 개선된 RC모델링과 해석기법 그리고 전산능력의 도움으로 하나씩 하나씩 사라져가고 있는 것은 큰 기쁨이 아닐 수 없다.

## 참 고 문 헌

1. 日本コンクリート工學協會, 特集: 阪神淡路大震災に學ぶ, 콘크리트工學, Vol. 33, No. 11, 1995
2. 日本土木學會, 特集: 土木構造物の耐震基準等に關する提言, 日本土木學會誌, Vol. 80, 1995, 7
3. 日本土木學會, 阪神淡路大震災被害分析と靱性率評價式, 1996
4. 대한토목학회, 특별좌담: 한국의 내진설계 그 현황과 앞으로의 대비책은?, 대한토목학회지, 제 43권, 제 4호, 1995, 4
5. 콘크리트학회, 특집: 국내 콘크리트구조물의 지진대비책, 콘크리트학회지, 제 7권 3호, 1995
6. Breen, J. E., "Structural Concrete: A Unifying Force in Building and Bridge Codes", Special Lecture Note of JCI '96 Convention, Japan Concrete Institute, 1996, 7

7. 日本土木學會, 콘크리트標準示方(耐震設計編),平成8年制定, 1996
8. 이동진, "지진해석과 내진설계", 콘크리트학회지(특집: 콘크리트구조물의 내진설계), 제 5권 2호, 1993, 6, pp. 9-19
9. 鹿島建設土木設計本部, 耐震設計法/限界狀態設計法, 鹿島出版會, 1996
10. 柴田明徳, 最新耐震構造解析, 森北出版株式會社, 1993
11. Chopra, A. K., Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Inc., 1995
12. Imbison, R. A., Seismic Design of Highway Bridges, Report FHWA/H-81-2, Federal Highway Administration Office, 1981
13. Clough, R. W., "Earthquake Response of Structures", Earthquake Engineering, Wiegel R. L. (Ed.)
14. CEB, RC Frames under Earthquake Loading, Thomas Telford, London, 1996
15. CEB, RC Elements under Cyclic Loading, Thomas Telford, London, 1996
16. Kaba, S. A. and Mahin, S. A., Refined Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Analysis, UCB/EERC-84/03, April, 1984
17. 前川宏一, 岡村由, "鐵筋콘크리트の非線形地震應答解析法の開發", 日本土木學會誌, 1996년 4월호, pp. 16-19

## 콘크리트 학회 전문서적보급안내

### 시멘트·콘크리트의 품질시험 및 품질관리 - 제3회 기술강좌 교재 -

- **집필진** : 최광규, 임창덕, 김무한, 한철규, 오병환, 윤재환, 장 란, 박승범, 최계식
- **A4/정가 22,000원 (회원 20,000원)**

### 철근콘크리트 건물의 배근설계 - 제6회 기술강좌 교재 -

- **집필진** : 김상식, 최기봉, 김중구, 윤호기, 김당현, 이동우, 윤영호, 양지수, 류영섭
- **A4, 436편/정가 22,000원 (회원 20,000원), 우송시 송료 2,100원 별도부담**

### 철근 콘크리트 구조설메뉴얼

- 본서는 국한강도 설계공식에 근거하여 도표와 설계예제를 작성하였으며, 그림을 이용하여 설계를 쉽고 빠르게 할 수 있고, 또 설계과정에서 반복되는 계산을 합축하여 계산과정을 단축시켜 설계실무에 편리하도록 집필되어 있다.
- 제1권 : 보·브라켓·기초의 설계      · 제2권 : 기둥·벽체의 설계      · 제3권 : 슬래브의 설계
- **A4, 3권/정가 37,000원 (회원 10% 할인), 우송시 송료 2,700원 부담**