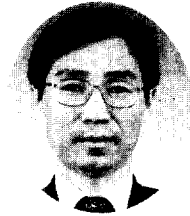


# 건물의 3차원 비탄성 동적해석 프로그램

Three Dimensional Inelastic Dynamic Analysis Program  
of Building Structures-CANNY



윤 태 호\*



조 한 옥\*

## 1. 개 요

최근 지진에서 발생한 건물의 손상을 살펴보면, 지진하중을 받는 건물의 3차원 거동에 의해서만 설명할 수 있는 경우가 많이 있다. 특히, 비대칭의 평면을 가지는 건물에서 발생하는 비틀림 거동은 2차원 모델로는 파악하기가 어렵기 때문에<sup>1)</sup> 구조물과 개별 부재의 3차원 거동을 보다 정확히 이해함으로써 구조물의 내진 능력을 더 정확히 평가할 수 있다. 이를 위해서는 3차원 모델에 의한 비탄성 동적해석이 필요하게 된다. 현재, 전산기의 발달과 더불어 많은 자유도를 요구하는 3차원 구조물의 비탄성해석이 가능해지고, 구조부재의 비탄성거동에 관한 많은 실험으로 다양한 구조부재의 모델이 개발되어 지진에 대한 건물의 설계시 개인용 컴퓨터를 사용하여 이러한 3차원 비탄성 동적 해석의 반영이 가능하게 되었다. 실제로 지진이 많이 발생하는 국가에서는 비탄성해석에 대해 많은 연구들이 진행되고 있으

며, 일부 국가에서는 건물의 내진설계시 강진에 대한 비탄성해석을 요구하고 있다.

이 글에서는 삼성건설 기술연구소에서 도곡동 102고층 건물의 해석에 사용하였던 3차원 비탄성 동적해석 프로그램인 CANNY-E<sup>3)</sup>에 대하여 그 구성과 특징을 소개하고자 한다.

## 2. 구조물의 모델링

### 2.1 가정

구조물은 유한개의 변형요소 즉 부재로 연결된 절점으로 구성되며 건물의 지반지지조건은 다음과 같은 세가지로 분류된다.

- 1) 강체 지반지로서 기초위치의 모든 절점은 강체기초에 완전하게 고정된다.
- 2) 강체 지반지로서 기초위치의 모든 절점이 3개의 회전 자유도를 가진다.
- 3) 탄성지반지로서 기초위치의 절점의 변위를 구속하기 위한 스프링을 사용한다. 이 스프링은 지반-

\* 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원

\*\* 정회원·삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원

구조물 상호작용을 표현하기 위해 사용할 수 있다.

기하학적 비선형성은 고려되지 않으므로 구조물의 초기형상이 유지되는 범위의 소변형에 한정된다. 하지만, 층 변위에 의한 층 전단력과 전도 모멘트에 대한 중력하중의 영향(P- $\Delta$ 효과)은 고려된다.

구조물의 질량은 절점에 집중되어 있는 것으로 가정한다. 즉, 동적 해석의 관성력은 절점에서 고려된다. 하지만, 관성력의 수평성분은 강상판이 가정될 경우, 바닥판의 무게중심에 집중될 수 있다. 모든 구조부재는 중심축을 가지는 질량이 없는 직선형 요소로 취급된다.

보-기둥 접합부는 강체로 가정되고 요소단부의 강역으로 표현한다(그림 1 참조). 강역의 길이는 접합부 변형을 근사적으로 표현하기 위해 사용할 수 있다.

초기하중(중력하중, 사용하중 또는 다른 정적 하중)하에서 발생하는 요소의 초기부재력은 단계별해석의 전 단계에 해석할 수도 있고 초기부재력으로 직접 입력될 수도 있다.

## 2.2 구조물의 자유도

구조물의 자유도는 강상판을 사용할 경우 고려되며, 바닥판 평면상에서의 변위를 말한다. 바닥판의 면외방향은 완전히 유연하여 강상판에 연결된 절점은 독립적인 수직변위를 가진다. 강상판은 중심의 위치에서 3개의 자유도(X변위, Y변위, 구조물의 비틀림 진동을 나타내는 Z축에 대한 회전)를 가질 수 있다. 구조물의 자유도는 진동주기와 모드를 구할 때도 사용된다.

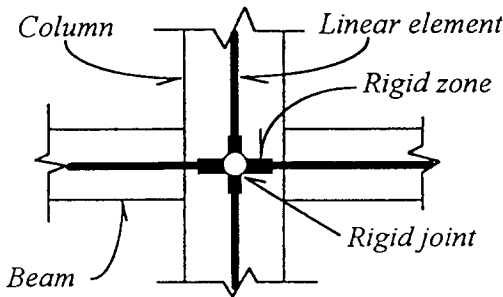


그림 1 보-기둥 접합부의 이상화

## 2.3 절점의 자유도

절점에는 일반적으로 6개의 자유도가 존재할 수 있다. 강상판의 가정에 따라 절점의 자유도는 달라진다. 강상판이 없는 바닥판의 절점은 6개의 자유도 (X, Y, Z축의 변위와 회전)를 가진다. 강상판에 연결된 절점은 최대 3개의 자유도(Z축 변위, X축과 Y축에 대한 회전)를 가진다. 절점의 2개의 수평변위는 강상판의 변위에 의해 결정된다. 절점의 비틀림 변위는 강상판 가정에 의해 무시된다. 따라서, 부재에 비틀림 변형은 존재하지 않는다.

## 2.4 해석방법

### 2.4.1 단계별 해석

해석 시에는 부분적으로 선형으로 가정된 힘-변위관계를 사용한 단계별해석을 사용한다. 평형조건을 맞추기 위해 두 가지 방법을 사용할 수 있다. 하나는 강성변화에 의한 불평형력을 다음 단계의 하중으로 가하는 방법이고 또 하나는 반복계산에 의해 불평형력을 주어진 허용오차 내로 줄이는 것이다.

비선형해석은 다음과 같은 가정 위에 수행된다.

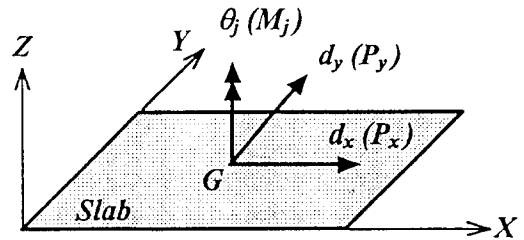


그림 2 강상판의 자유도

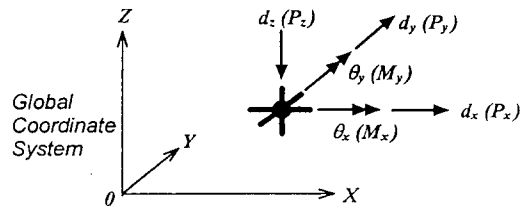


그림 3 절점의 자유도

- 선형 입력진동
- 비선형 힘-변위관계
- 절점에서의 변위적합성
- 절점에서의 평형조건 (관성력, 감쇠력, 내력, 외력)
- 가속도, 속도, 변위사이의 미분관계

임의의 시간에서 각 요소의 모든 스프링의 증분 변위는 절점의 변위로부터 저합조건에 의하여 구해지고, 스프링의 증분력은 미소시간구간내의 선형관계에 근거하여 증분변위로부터 구해진다.

계산된 변위와 힘의 증분이 스프링의 힘-변위 관계를 만족하지 못하게 되어 불평형력(그림 4)이 발생하면 이를 다음 단계의 하중으로 가한다.

2.4.2 정적해석

정적해석은 단조증가하중(Pushover해석)이나 반복하중에 대하여 가능하며 하중조절, 변위조절 또는 하중-변위조절의 혼합이 가능하다.

2.4.3 운동방정식의 수치저분

구조물의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M\Delta X + C\Delta \dot{X} + K\Delta \ddot{X} = \Delta F_e - F_u$$

- $M$  = diagonal mass matrix
- $C$  = instantaneous damping matrix
- =  $a_k K + a_m M + a_0 K_0$

$\Delta X, \Delta \dot{X}, \Delta \ddot{X}$  = increment of nodal displacement, velocity, acceleration vector

$K$  = instantaneous stiffness matrix

$K_0$  = initial stiffness matrix

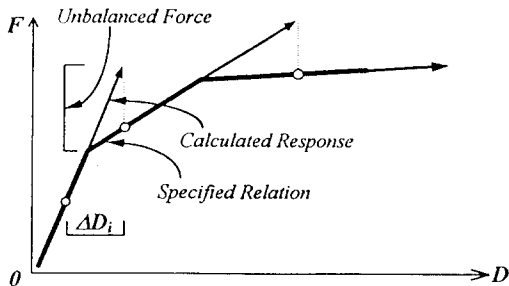


그림 4 비선형성에 의한 불평형력

$\Delta F_e$  = increment of external force vector

$F_u$  = unbalanced force vector at the beginning of time

$a_k$  = damping factor proportional to instantaneous stiffness

$a_m$  = damping factor proportional mass

$a_0$  = damping factor proportional to initial stiffness

운동방정식을 풀기 위해 두 가지 수치적분법을 사용한다.

- Newmark's beta 법

- Wilson  $\theta$ 법

구조물의 거동을 특정모드로 가정하는 의사 동적해석에는 유한차분법을 사용한다. 강성행렬  $K$ 의 조합과 저장에는 skyline matrix 법을 사용하고 메모리의 최소화를 위해 내부적으로 optimum numbering system을 사용한다.

2.4.4 진동모드와 주기

진동모드와 주기를 구하기 위한 고유치 해석법으로는 Jacobi 반복법을 사용한다. 이 방법은 master DOF라고 하는 적은 수의 자유도에 대한 모드를 구할 수 있다. 강상판을 사용할 경우 강상판의 횡변위와 회전에 대한 자유도는 항상 master DOF에 포함된다.

2.5 부재 모델

2.5.1 기둥

기둥은 축력과 2축 휨, 2축 전단을 동시에 받는다. 기둥의 축은 임의의 방향을 가질 수 있다. 이 프로그램의 독특한 기둥모델은 선형요소와 양단의 multi-spring요소(이하 MS요소)<sup>1)</sup>로 구성되고 선형요소는 축스프링, 2방향전단스프링을 포함할 수 있다(그림 5). MS요소는 기둥의 힘-변위 관계를 고려할 때 길이가 없는 것으로 간주된다. 이것은 여러 개의 일축 스프링으로 구성된다. 각 스프링은 축력을 받고 축변형을 일으킨다. 스프링의 변위는 평면가정에 근거하고 MS요소의 축변형과 휨변형에 의해 결정된다. 이러한 MS요소

는 2축 휨과 축력의 상호작용을 모두 고려할 수 있다. 선형요소는 휨에 대해서는 탄성거동을 하며 축변형과 전단변형에는 비탄성거동을 할 수 있다.

1) MS요소

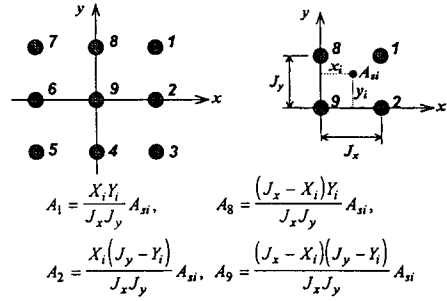
MS요소는 최소 4개의 스프링으로 구성되고 스프링의 수는 재료특성, 단면크기, 철근의 배치 등에 의해 달라지고 기둥거동의 정확성을 좌우한다. 예를 들어 철근이 사변에 분포된 사각형단면 (B×D)은 그림 6과 같이 16개의 콘크리트 스프링과 8개의 철근스프링으로 모델링할 수 있다.

단면 중심에 철근이 있을 경우 9번째 스프링을 중심에 배치한다.

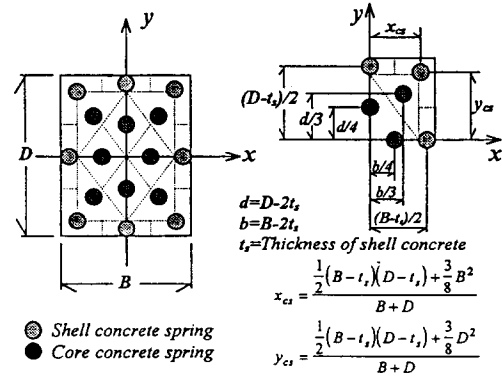
MS요소의 좌우에서 모멘트, 축력, 전단력이 같기 위해서는 길이가 없는 것으로 가정해야 한다. 그러나, MS요소의 스프링이 강체가 아니므로 기둥의 초기강성이 감소하게 되는데, 수치적인 한계로 강제로 취급하는 것은 용이하지 않다. 따라서, 기둥단부의 작은 영역(이하 소성영역)의 유연도를 스프링의 초기유연도로 부여하는 방법을 사용한다(그림 7). 또한, 큰 압축응력 하의 콘크리트의 비탄성거동, 균열에 의한 강성

저하, 인장철근의 부착슬립등에 의해 나타나는 철근콘크리트 휨부재의 항복전 강성저하를 고려하기 위하여 강성저하계수를 사용한다.

MS요소를 사용한 기둥은 4개의 절점을 가지게 되는데, 기둥의 강성이 구성된 후 내부의 2개 절점은 소거하여 외부 2개 절점에 대한 강성만을 사용한다.

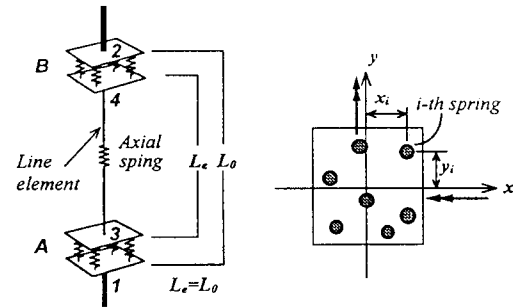


(a) Steel Springs



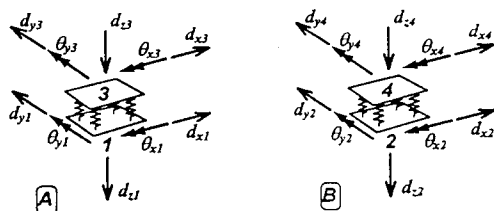
(b) Concrete Springs and Location

그림 6 직사각형단면의 MS모델



(a) Idealization of Column

(b) MS Element A, B



(c) Base MS Element

(d) Top MS Element

그림 5 MS모델을 사용한 기둥

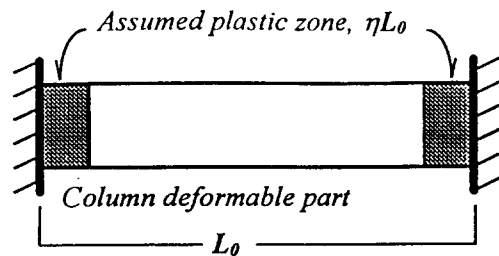


그림 7 소성영역의 가정

2) 2축 전단

기둥에 두 방향의 횡력이 작용할 때, 2축 전단 모델을 사용한다. 이것은 기둥의 중앙부에 방사형으로 배열된 여러 개의 전단스프링으로 구성된다(그림 8). 각각의 전단스프링은 1축방향의 힘-변위관계를 가진다. 스프링의 총 개수는 짝수이어야 하며, 그중 2개는 단면의 주축에 평행해야 한다.

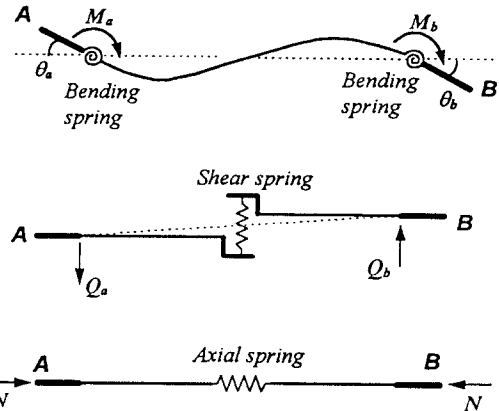


그림 9 보 요소의 모델

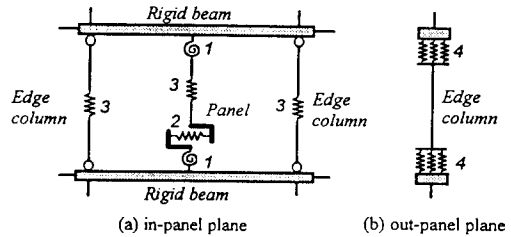


그림 10 전단벽 요소

2.5.3 전단벽

전단벽은 면내의 휨, 전단, 축변형을 가지며 면외강성은 없다. 전단벽 또한 벽체의 중심선(수직축에 평행하여야 함)을 따라 선형요소로 모델링된다(그림 10). 휨, 전단, 축변형은 각각의 스프링으로 나타내며 이들 사이의 상호작용은 고려되지 않는다. 벽체의 4개 절점의 수직변위로부터 휨변형을 계산하기 위해 평면가정이 사용된다.

벽체의 양면에 모서리기둥을 놓을 수 있고 이것은 면내에서는 축력만을 받는 것으로 간주된

다. 면외로는 휨과 전단변형을 가질 수 있다. MS요소를 사용할 경우 면내 축변형과 면외 휨 변형의 상호작용을 고려할 수 있다.

2.5.4 가새

가새는 2개의 절점을 연결하고 인장 또는 압축력만을 받는 부재이다. 가새는 공간상의 임의의 방향으로 놓일 수 있다. 또한, 2개 절점사이의 좌표축 방향의 상대변위를 구속할 수 있다.(그림 11).

2.5.5 케이블

케이블 요소는 시작 절점과 끝절점을 가진다. 시작절점과 끝절점 사이에는 그림 12에 보이는 바와 같이 공간상의 위치변화를 나타내도록 중간 절점을 여러 개 가질 수 있다. 케이블요소는 인장에만 기여한다.

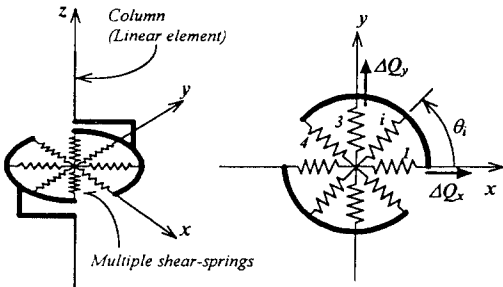
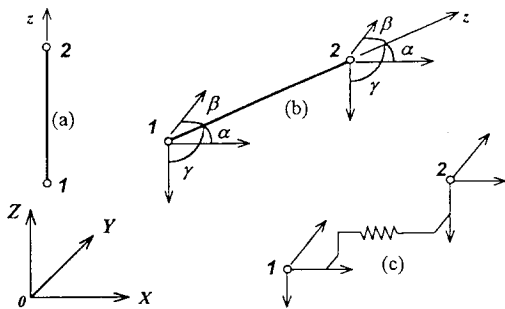


그림 8 2축 전단모델



(a) Parallel to the global Cartesian axes;  
 (b) In 3D space; (c) Relative to the displacement in the direction of the global Cartesian axis.

그림 11 가새 요소

2. 5. 6 구속스프링

구속스프링은 단순한 1개의 스프링요소이다. 이것은 절점의 임의의 변위성분(3개의 회전성분과 3개의 이동성분)을 구속하기 위해 사용된다.

1축 휨을 받는 수평요소(보)를 대치하기 위해 그림 13에서 보이는 바와 같이 특수한 회전스프링을 사용할 수 있다. 이때, 하중은 대치된 보에 의해 전달되는 전단력을 표현하는데, 이것은 주어진 비율에 의해 스프링의 휨 모멘트에 비례하게 된다. 전체 구조물에서 부분 구조물을 해석할 때, 수직부재(기둥)의 축력을 변화시키지 않고 해석을 가능하게 해준다.

2. 6 이력모델

비선형 힘-변위관계를 가지는 스프링의 이력 모델로 본 프로그램에서는 다음과 같은 다양한 모델들을 해석할 수 있다.

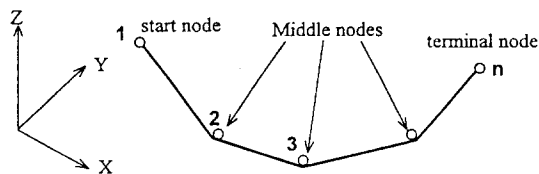


그림 12 케이블 요소

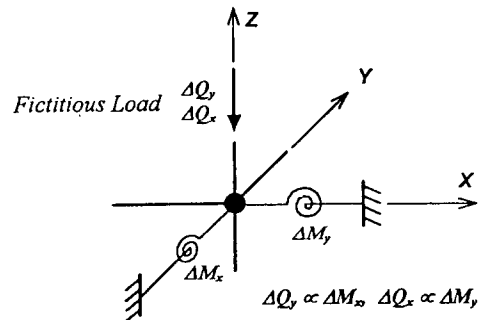


그림 13 특수한 회전스프링

2. 6. 1 1축 이력모델

- linear elastic model
- tension only elastic model
- compression only elastic model
- degrading bilinear model
- modified Clough model
- degrading bilinear/trilinear model
- cross-peak bilinear model
- cross-peak bilinear/trilinear model
- cross-peak bilinear/trilinear pinching model
- bilinear/trilinear origin oriented model
- bilinear/trilinear peak oriented model
- bilinear slip model
- biliner/trilinear slip model
- biliner elastic model
- bilinear/trilinear elastic model
- CANNY simple bilinear/trilinear model
- CANNY sophisticated bilinear/trilinear model
- axial stiffness model 1
- axial stiffness model 2

2. 6. 2 MS요소의 이력모델

콘크리트스프링의 이력모델은 압축강도이전의 강성저하, 압축강도저하(softening), 인장강도의 선택 등을 표현할 수 있다. 철근스프링의 이력모델은 bilinear 또는 trilinear가 가능하다.

- compression only elastic model linear elastic model
- steel spring model (bilinear 또는 trilinear)
- concrete spring model(step-down softening)
- concrete spring model(strength decay at next reloading)

### 3. 해석예

해석의 예로 12층의 그림 14와 같은 건물에 E1 Centro지진의 NS와 EW성분을 동시에 가하여 IBM 호환 PC를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석의 결과로는 다음과 같은 항목을 얻을 수 있다.

- (1) 시간이력 결과
- 각 층의 외력
  - 층 변위, 속도, 가속도

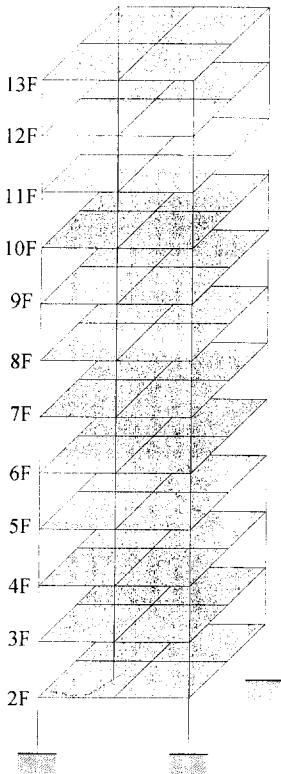


그림 14 해석대상 건물

- 층 전단력
- 층간 변위
- 진동 주기
- 구조물의 손상지수
- 절점의 변위, 속도, 가속도

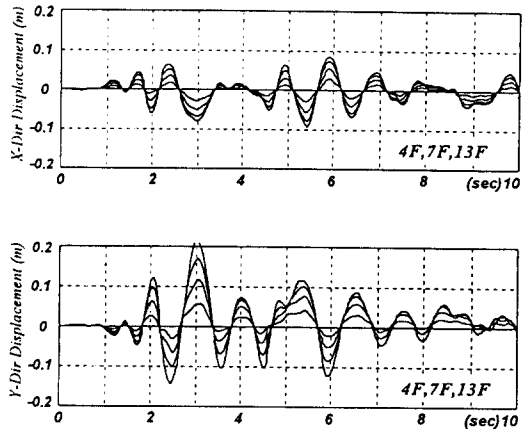


그림 15 변위의 시간이력

- 부재의 이력곡선, 이력에너지, 손상지수
- (2) 최대값 : 층 전단력, 층간 변위, 층 변위, 전도 모멘트
- 해석의 결과 중 몇 개층의 변위이력을 그림 15에 도시하였다.

### 4. 맺음말

건물의 3차원 비탄성 동적해석은 지진에 대한 구조물의 거동을 보다 정확하게 예측하고 구조물의 안전성을 확인하기 위한 중요한 수단이라 할 수 있으며 향후 보다 많은 실험과 연구가 계속적으로 요구된다.

### 참고 문헌

1. De la Llera, J. C., and Chopra, A. K. (1996), "Inelastic Behavior of Asymmetric Multistorey Buildings." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1996. 597-606
2. Li Kang-Ning, Otani, S., "Multi-Spring mod-

el for 3-dimensional analysis of Rc members", Structural Engineering and Mechanics, Vol.1, No.1, 1993, pp.37-48.

3 Kang-Ning Li, "CANNY-E Manual," Canny Consultants Pte. Ltd., 1996