

수평하중을 받는 프리캐스트 콘크리트 대형 판넬 부분구조의 비선형 해석

Nonlinear Finite Element Analysis for the Precast Concrete Large
Panel Subassemblage subjected to Horizontal Force

○박 병 순* 서 수 연** 이 원 호*** 이 리 형****
Park, B. S. Seo, S. Y. Yi, W. H. Lee, L. H.

ABSTRACT

During earthquakes, the joints provide a principal means for energy dissipation, and these are also responsible for introducing a nonlinear behavior to the overall building system, while large panels remain in the elastic range.

In analysis for the precast concrete large panel system, it is difficult to make a general analysis for their behavior because of differences in joint details. Therefore, in case of presence of vertical joints, it is more difficult because of the interaction between the horizontal joints and vertical joints.

In this study, a nonlinear finite element analysis is performed using the gap element, friction element, and concrete material model, and the results are compared with the experimental results.

1. 서론

프리캐스트 콘크리트 대형 판넬 구조 (이하, 대형 판넬 구조)에 지진하중이 작용하게 되면 일반적으로 벽판넬보다 다소 약한 접합부를 따라 균열과 미끄러짐이 발생하고, 지진에너지는 약화된 접합부를 따라 에너지를 소산하게 된다. 따라서 접합부는 에너지를 흡수하는 중요한 기구가 되며, 전체 건물의 비선형거동을 지배하게 된다.

대형 판넬 구조 해석시 접합부에 대한 적절한 모델링이 필수적이지만, 대형 판넬 구조는 공법별로 접합부 상세가 서로 다르기 때문에 구조적인 거동이 다양하여 일반적인 해석을 하기 어렵다. 수평하중에 대한 대형 판넬 구조의 일반적인 거동은 그림 1과 같이 단순벽 (Simple Wall) 구조일 경우 미끄러짐과 들림거동이 지배적이지만, 수직접합부가 있는 연결벽 구조인 경우는 수직 및 수평접합부의 강성에 따라 그 거동이 달라지기 때문에 해석이 더욱 어려워지게 된다.

대형 판넬 구조의 해석과 관련된 기존 연구로서는 J.M.Becker[6]가 수평접합부의 들림과 전단 미끄러짐을 접촉요소 (Contact Element)로 모델링하여 동적해석을 하였으며, A.H.Anis[7] 등은 기존의 3가지 수평접합부 모델링에 대한 특성을 비교하였고, G.H.Powell[8]은 수평접합부만 있는 단순벽 시스템에 대하여 접합부를 7가지로 모델링하였다. 국내에서는 김성호[5]가 개구부와 플랜지 벽이 있는 경우에 대하여 틈요소와 마찰요소를 사용하여 해석하였다.

본 연구에서는 수평접합부와 수직접합부가 동시에 존재하고 축력과 수평력이 동시에 작용하는 대형 판넬 부분구조의 동적해석을 위한 기초작업으로서, 기존 실험 결과[1]를 대상으로 여러 모델링 기법 중 대상 실험체의 거동을 잘 묘사할 수 있는 틈요소와 마찰요소를 사용하여 수평접합부를 모델링하고, 벽판넬과 수직접합부는 콘크리트 재료모델을 사용하여 비선형 유한요소 해석을 수행함으로써 대상 실험체의 비선형 거동 특성을 파악하고자 한다.

* 한양대 건축공학과 석사과정

** 한양대 건축공학과 박사과정

*** 광운대 건축공학과 조교수

**** 한양대 건축공학과 교수

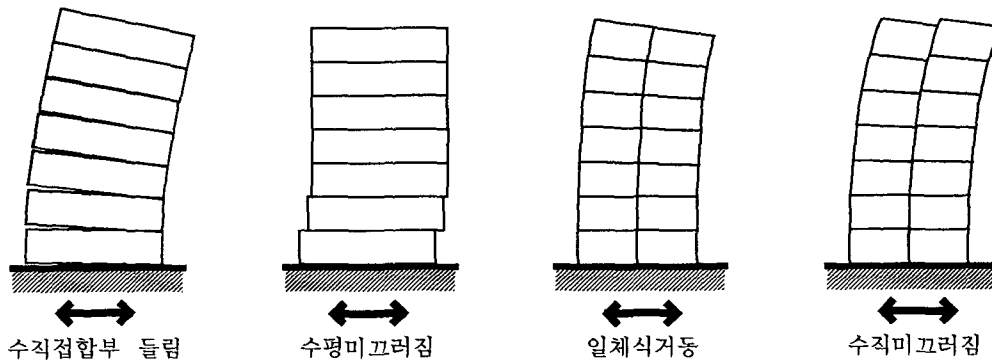


그림 1. 대형 판넬 구조의 거동

해석은 범용 비선형 해석 프로그램인 ADINA[9] (Automatic Dynamic Incremental Analysis)를 이용하며, 사용된 컴퓨터는 VMS/VAX 8700 이다.

2. 실험

2.1 실험 개요

본 연구에서 대상으로 하고 있는 실험체는 1/2 축소 실험체로서 수평접합부와 수직접합부가 동시에 존재하며, 상·하부 벽판넬의 수직철근은 조인트 박스에서 볼트에 의하여 연결된다. 실험체 상세를 표 1에 나타내었고, 실험체 형상은 그림 2와 같다.

표 1. 실험체 일람

단위 : mm

높이	길이	벽판넬	루프 철근	수직보 강철근	수평접합부 조인트 박스	수직접합부 전단키	축응력 (kg/cm ²)
1300	1320	φ3-100x100	φ5	HD13	65x77.3x35-1.2	70x70	28.0

실험체에 작용하는 하중은 대상 건물의 작용 축력을 단면의 축소율에 따라 축소하여 실제와 동일한 응력이 되도록 일정하게 가력하였고, 벽판넬 상부에서 수평하중을 반복 가력하였다.

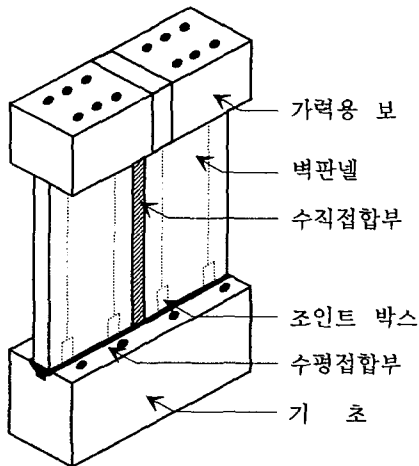


그림 2. 실험체 형상

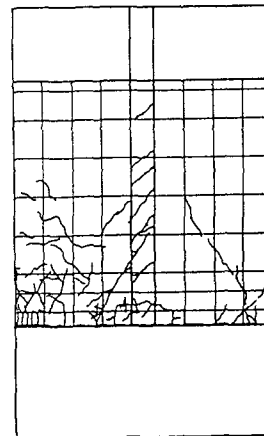


그림 3. 실험체의 파괴상황

2.2 실험결과

실험결과 최대하중의 34%인 7.5t에서 수평접합부에 초기 균열이 발생하였으며, 수직접합부에서의 균열은 최대하중의 55%인 12.4t, 사인장 균열은 최대하중 직전에 발생하였다. 최대하중에

서 수평접합부의 압축측 콘크리트에 압괴가 발생하였고, 그 이후 벽판넬 하부에 수평균열이 발생하면서 강도가 저하되었으며, 인장측 조인트 박스의 파괴와 압축측 콘크리트의 압괴로 종국 파괴에 도달하였다. 결국 실험체의 기본적인 거동은 수직접합부에서 일부 균열이 발생하였지만 수평접합부의 들림 및 압축에 의하여 지배되는 것으로 나타났다. 실험종료시 파괴상황은 그림 3에 나타내었고, 실험체의 하중-변위 곡선은 그림 4에 나타내었다.

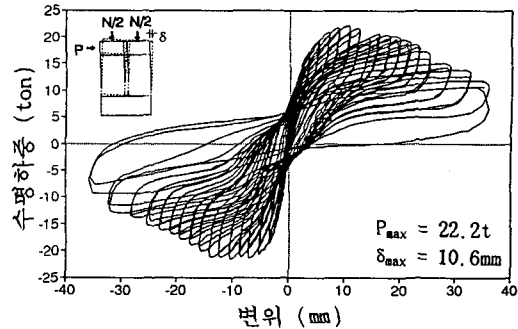


그림 4. 실험체의 하중-변위 곡선

3. 구성부재의 이상화

대상 실험체의 주요 구성부재는 벽판넬, 수직접합부 및 수평접합부로서, 각 구성 부재의 이상화는 다음과 같다.

3.1 벽판넬

벽판넬은 평면응력 (Plane Stress) 상태로 고려하고, 2차원 응력에서의 콘크리트 재료 성질은 K. J. Bathe와 S. Ramaswamy의 재료모델[10]을 사용하여 콘크리트의 인장에 의한 균열 및 압축에 의한 파쇄를 고려한다. 다만 수평접합부의 마찰요소에 의한 응력집중으로 벽판넬 단부의 콘크리트가 파괴되는 것을 방지하기 위하여 단부를 보요소로 보강한다.

벽판넬에 배근된 철근 및 용접철망은 축응력만을 고려한 트러스 모델을 사용하며, 완전 탄소성 재료로 모델링하여 축력에 따른 항복을 고려한다.

3.2 수직접합부

수직접합부는 수평하중을 받을 때 주로 전단력을 전달하며, 수직접합부의 전단내력에 영향을 주는 요소는 전단키의 유무, 전단키의 형상, 루프 철근량, 충전 콘크리트 강도, 프리캐스트 콘크리트와 충전재와의 부착력 등 여러가지 요소가 있다. 이러한 모든 요소를 적절히 모델링하기 위하여 전단키의 전단파괴에 의한 강도저하, 전단키의 압축파괴, 수직 접합부의 미끄러짐, 루프 철근에 의한 전단 마찰력 등을 고려하여야 하지만, 본 연구에서는 해석의 간편화를 위하여 수직접합부의 연결효과만을 고려하여 전단키의 형상을 무시하고 벽판넬과 연속된 것으로 간주한다. 콘크리트의 강도는 충전 모르타의 0.8배의 값으로 한다. 접합부를 가로지르는 루프 철근은 트러스 모델을 사용하고, 완전 탄소성 재료로 모델링한다.

3.3 수평접합부

수평접합부는 상부에서 전달되는 축력을 하부로 전달하고, 수평하중에 대하여 전단 미끄러짐과 들림거동을 한다. 수평접합부에 대한 하중 전달요소의 이상화는 다음과 같다.

(1) 전단 저항

Mohr-Coulomb의 파괴 기준으로부터, 미끄러짐이 발생하는 면에서의 전단응력은 식 (1)과 같다.

$$|\tau_s| = c + \sigma_N \cdot \tan\phi \quad (1)$$

미끄러짐면에 직각으로 철근이 배근되는 경우에는 콘크리트의 압축력에 철근의 전단마찰력이 더해짐으로써 식 (1)은 식 (2)와 같이 된다.

$$\tau_s = c + (\sigma_N + \rho \cdot f_y) \cdot \tan\phi \quad (2)$$

여기서, c 와 ϕ 는 부착력과 전단마찰각을 나타낸다.

국내 규준식에서는 식 (2)의 형식을 취하고 있으나, 대형 판넬 구조의 경우, 온도영향 등의 이유 때문에 부착력, c 를 고려하지 않고 있다. 수평접합부의 전단모델은 식 (2)를 사용하여 최대강도를 구하고, 그림 5와 같은 마찰요소로 이상화 한다. 전단 마찰 계수는 국내 규준에서 규정하고 있는 0.6을 사용하며, 수평접합부의 전단강성은 CEB-Code[11]에서 제안하고 있는 식 (3)의 값으로 하고, 완전 탄소성 재료로 이상화 한다.

$$K_s = V_s \cdot 5 \times 10^3 / A_j \quad (3)$$

여기서,

K_s, V_s : 전단 강성 및 최대전단강도

A_j : 전단면적 (Cross-Section Area)

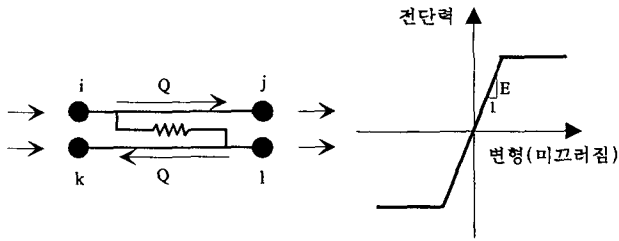


그림 5. 마찰요소 (Friction Element)

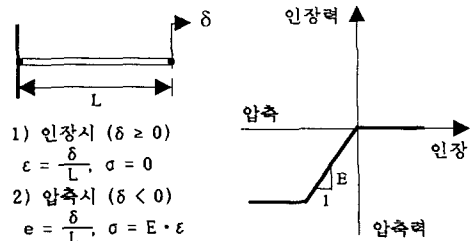
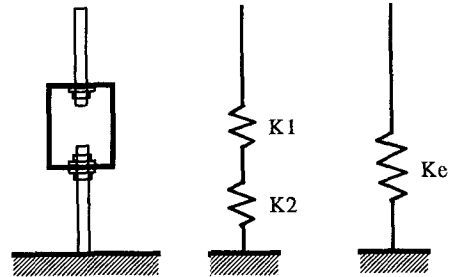


그림 6. 틈요소 (Gap Element)

(2) 휨 저항

벽판넬에 수평하중이 작용할 경우, 벽판넬의 휨모멘트에 의한 인장응력이 압축응력을 넘어서면 벽판넬과 접합부 사이에서 들림이 발생하고, 인장응력에 대한 저항은 접합부에 수직으로 배근된 철근에 의하여 이루어진다. 접합부의 반대쪽에서는 압축응력과 전단응력이 증가하게 되어 접합부 그라우트의 파쇄, 또는 벽판넬의 쪼개짐에 의한 파괴를 일으킬 수 있다.

접합부의 들림 거동을 이상화하기 위하여, 콘크리트는 그림 6과 같은 틈요소 (Gap Element)를 사용하여, 들림 발생시 인장응력을 받을 수 없도록 한 압축 스프링으로 이상화 하고, 접합부 수직철근은 그림 7과 같이 조인트 박스의 강성을 고려한 유효강성, $K_e = 1.3 \times 10^5$ 을 사용한다.



- K1 : 조인트 박스 강성
- K2 : 수직철근 강성
- Ke : 유효강성

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$$

그림 7. 조인트 박스의 유효강성

수평접합부의 최대 지지력 강도는 김성수[4]가 제안한 식 (4)를 사용하며, 접합부 그라우트의 압괴는 압축스프링의 항복으로 이상화 한다.

$$P_u = f_u \cdot t_g \cdot L / K \tag{4}$$

여기서,

$$K = 0.617 \cdot \ln(4.062 \cdot t_g / t + 1)$$

P_u : 최대 지지력 강도

f_u : 벽체와 그라우트의 압축강도 중 작은 값

t, t_g : 벽체의 두께 및 그라우트의 물림폭

L : 벽체의 길이

4. 해석결과

대상 실험체는 총 195개의 절점을 가지며, 156개의 2차원 요소와 352개의 트러스 요소로 이상화하였다. 경계조건 및 요소분할을 그림 8에 나타내었다. 축력은 가력용 보 상부에서 2차원 평면응력 (2-D Pressure)을 이용하여 등분포 하중으로 가력하였으며, 해석 전과정에서 일정한 값으로 하였다. 수평력은 실험과 같은 위치인 가력용 보 단부 중앙에서 집중하중으로 가력하였다:

해석결과, 전체적인 거동은 수평접합부의 들림거동과 미끄러짐 거동을 보였으며, 수평접합부 압축측 콘크리트의 파쇄와 인장측 수직철근의 파괴로 해석이 종료되었다. 이러한 거동은 실제 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

4.1 하중-변위 관계

그림 9의 실험시의 하중-변위 포락선과 해석에 의한 하중-변위 곡선으로부터 실험시 최대강도의 86%까지 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 그 이후부터 최대강도까지는 해석결과가 실험결과보다 1.1배 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 실험시 최대강도까지 16회의 반복가력을 하였기 때문에 단조가력에 대한 해석결과와 차이를 보이고 있는 것으로 판단된다.

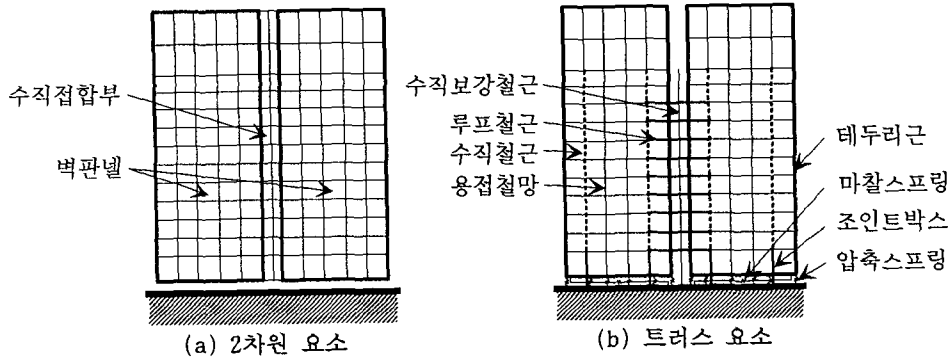


그림 8. 경계조건 및 요소분할

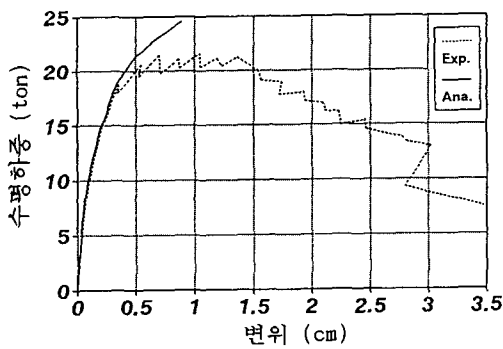


그림 9. 하중-변위 곡선 비교

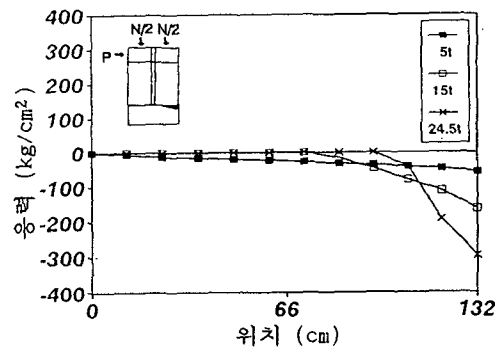
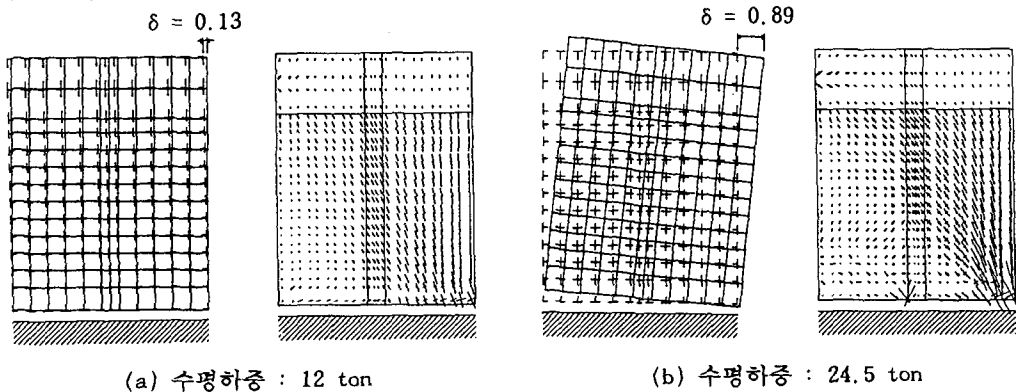


그림 10. 압축 스프링의 응력 변화

4.2 변형상황 및 주응력도

부분적인 비선형 거동을 살펴보면, 15t에서 수직접합부 하부에서 사인장 균열이 발생하기 시작하였고, 16t까지는 모든 트러스 부재가 탄성 상태를 유지하고 있다. 17t에서 수직보강철근의 항복이 시작되었고, 19t에서 좌측 벽판넬 외부 인장철근의 항복과, 20.5t에서 우측 전단 스프링이 항복하였으며, 21.5t에서 좌측 내부 인장 철근이 항복하였다. 그 이후 24.5t에서 수평접합부 압축 스프링이 항복하고, 수직접합부 하부의 사인장 균열이 중앙까지 확산되었으며, 인장측 수직철근이 극한 강도에 도달하면서 해석이 종료되었다.

하중 증가에 따른 수평접합부의 압축응력변화를 그림 10에 나타내었다. 하중이 증가하면서 점차적으로 들림이 발생하고 있으며, 최대 하중시에는 압축측 단부에 압축응력이 집중되어 압축 스프링이 항복하였다.



(a) 수평하중 : 12 ton

(b) 수평하중 : 24.5 ton

그림 11. 변형상황 및 주응력도

수평하중이 12t일 때의 변형상황과 주응력도를 그림 11(a)에 나타내었다. 들림은 왼쪽 벽판넬 하부 전체에서 일어나고 있으며, 수평접합부의 전단전달은 좌측의 전단응력이 6.0kg/cm^2 이고, 우측이 12.3kg/cm^2 로서 압축측에서 약 2배의 전단력을 전달하고 있다. 수직접합부의 응력은 중앙에서 가장 크게 나타나고 있으며, 최대 전단응력은 16.2kg/cm^2 이다.

최대하중일 때의 변형상황과 주응력도를 그림 11(b)에 나타내었다. 수평접합부의 들림은 우측에서 26.77cm까지 발생하고 있으며, 우측 벽판넬 하부에서 압축응력이 크게 집중되는 것을 알 수 있다. 수평접합부의 전단전달은 좌측의 전단응력이 9.7kg/cm^2 이고, 우측은 27.7kg/cm^2 로서 압축측에서 거의 3배의 전단력을 전달하고 있다. 수직접합부는 사인장 균열이 중앙까지 확산되고 있으며, 최대 전단응력은 29.3kg/cm^2 이다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 수평접합부와 수직접합부를 동시에 갖고 있는 대형 판넬 구조의 해석을 위한 기초 작업으로서, 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 수평접합부를 톱요소와 마찰요소로 이상화하고, 벽판넬 및 수직접합부를 K.J.Bathe와 S.Ramaswamy의 콘크리트 모델을 사용하여 해석한 결과, 실험시 최대강도의 86%까지 잘 일치하는 거동을 보였으며, 이러한 모델을 사용하여 대형 판넬 부분구조의 비선형 거동을 예측할 수 있다고 판단된다.

향후 연구과제로서, 반복 가력에 의한 강도저하, 압축응력에 따른 전단력의 감소, 수직접합부의 다양한 거동을 이상화 할 수 있는 모델을 개발함으로써, 이력거동에 대한 해석을 실시하고, 궁극적으로는 대형 판넬 구조의 동적 해석을 수행하고자 한다.

참고문헌

- [1] 서수연, 박병순, 이현호, 조상규, 이원호, 이리형 (1992), "반복하중을 받는 대형 콘크리트 판구조의 이력거동에 관한 실험적 연구 - 1층 대형판 구조체 실험결과를 중심으로 -", 대한건축학회학술발표논문집, 제12권 제2호, 10월, pp. 529~534.
- [2] 서수연, 박병순, 이봉효, 김성수, 이원호, 이리형 (1992), "반복하중을 받는 대형 콘크리트 판구조의 이력거동에 관한 실험적 연구 - 3층 대형판 구조체 실험결과를 중심으로 -", 한국콘크리트학회학술발표논문집, 제4권 2호, 11월, pp.179~184.
- [3] 서수연, 박병순, 백용준, 이원호, 이리형 (1993), "지진하중을 받는 대형 콘크리트 판구조의 동적거동 - 3층 입체구조의 진동실험결과를 중심으로 -", 한국콘크리트학회학술발표논문집, 제5권 1호, 5월, pp.148~153.
- [4] 김성수 (1990), "대형콘크리트 판구조의 접합부 거동에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, 6월.
- [5] 김성호(1990), "P.C 대형판 부분구조의 비선형 거동에 관한 실험과 해석 비교연구", 한국전산구조공학회학술발표논문집, 제6권 1집, pp.47-54.
- [6] Becker, M.J. (1980), "Seismic Response of Precast Concrete Walls", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, pp.545-564
- [7] Anis, A.H., Burnett, E.F.P. and McNeice, G.M. (1980), "Finite Element Modelling of Jointed Structures", National Research Council of Canada, pp.540-546.
- [8] Schrieker, V. and Powell, G.H. (1980), Inelastic Seismic Analysis of Large Panel Buildings, EERC-80/38, 9월.
- [9] ADINA Engineering (1984), ADINA System Theory and Modeling Guide, Report AE 84-1, December.
- [10] ADINA Engineering (1983), ADINA System Verification Manual, Report AE 83-5, December.
- [11] Comite Euro-International Du Beton (1993), CEB-FIP Model Code.