

수평 접합부를 고려한 프리캐스트 대형판
구조물의 동적 해석에 관한 연구
Dynamic Analysis of Precast Concrete Large Panel
Structures with Horizontal Joints

정 일영*
Chung, Il Young

송 진규**
Song, Jin Gyu

강 해관***
Gang, Hae Guan

ABSTRACT

The damage in precast large panel structures subjected to destructive earthquakes is generally localized in the joints. Particularly, the horizontal joints influence on the stability and integrity of the overall structure. In this research a dynamic analysis was carried out by the macro model that idealized the horizontal joints as inelastic-nonlinear spring systems. It is capable of simulating the behavior of precast concrete structures using the mathematical model.

As a result of the dynamic parametric study for the case of 0.12g peak base accelerations, it is found that all joints behave elastically for sliding and opening and that all forces are well distributed without excessive local concentration on any horizontal joints.

1. 서 론

프리캐스트 대형판 구조는 1960년대 우리나라에 처음 도입된 이래, 최근에는 고층 아파트의 건설에도 많이 사용되고 있다. 그러나 이들의 대부분이 외국에서 도입된 것으로 구조상세나 시공공법 및 경제성 등에 있어서 충분한 검토가 이루어지지 못한 실정이다. 이로 인하여, 비록 1992년 프리캐스트 조립식 패널 구조물에 대한 설계기준 및 공사 표준 시방서가 건설부로부터 제시된 바 있으나 이 기준은 조립식 구조물 설계시 벽판구조, 골조구조, 프리스트레스 구조설계 및 시공에 관한 최소한의 사항만을 규정하였고 그 해당범위가 매우 제한적이므로 다양한 조립식 구조시스템에 대하여 이 기준의 조항을 적용하기에는 곤란하다. 특히, 구조적 측면에서 볼 때, 큰 지진이 많은 외국과는 달리 진도 6정도로 설계된 우리나라의 설계 지진 하중 하에서 합리적인 프리캐스트 구조물의 내진설계를 위한 다양한 실험 및 해석적 연구가 매우 부족하여 조립식 구조가 갖는 많은 장점에도 불구하고 아직까지 현실적인 고층화 방안을 도출하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 조립식 대형판넬 구조물에 대한 지진해석을 위한 수학적 모델을 구성하고, 이를 이용하여 프리캐스트 구조물이 국내에서 규정하고 있는 값을 갖는 지진동에 대하여 소요내진 성능을 확보하고 있는지에 대한 검토와 하중전달 및 변형특성에 대하여 고찰하는 데 있다.

본 논문에서는 접합부의 이력거동을 분절 스프링으로 이상화한 거시적 모델을 사용하여 수평접합부를 갖는 프리캐스트 대형판 구조물이 지진동을 받을 때의 내진 성능을 고찰하였다. 동적해석을 위하여 사용한 기본 프로그램은 Drain-2D를 근간으로 하여 여기에 본 연구에서 개발한 패널 요소 및 탄소성 스프링

* 서울대학교 건축학과 교수

** 현대건설기술연구소 선임연구원

*** 서울대학교 건축학과 박사과정

요소를 추가시켰다. 수치해석 방법은 Newmark에 의해 제시된 바 있는 상수가속도법을 사용하였다. 이 방법은 비록 정해를 얻기 위한 시간증분이 매우 작아야 하는 단점이 있으나 모든 진동주기와 시간 증분에 대한 안정성을 보장하게 되는 이점이 있다.

2. 수평 접합부를 갖는 프리캐스트 구조물의 거동 특성

프리캐스트 대형판 구조물과 일체식 현장 치기 콘크리트 구조물에 있어서 가장 큰 차이점은, 전자의 경우 패널들 사이에 수평 또는 수직의 접합부가 존재한다는 것이다. 일반적으로 이들 접합부에는 기균열면이 존재하게 되므로 하중 전달시 연속성이 저하되며, 이로 인하여 강도와 강성이 패널에 비해 상대적으로 떨어지게 된다. 따라서 접합부 설계시, 강도와 연성도의 균형이 이루어지도록 함으로써 연결 패널이 과도한 강도를 받지 않고, 접합면에서도 과도한 변형이 일어나지 않도록 해야한다. 수평접합부는 패널들 사이에서 전단력과 수직력을 전달하는 역할을 하며, 그 파괴 메커니즘은 미끄러짐(sliding), 벌어짐(opening), 균열(cracking), 파쇄(crushing) 등으로 나타난다. 횡력에 의한 프리캐스트 대형판 구조물의 주요 거동 특성은 전단력에 의한 전단 미끄러짐과 전도 모멘트에 의한 수직 개폐 거동(rocking motion)으로 나타난다. 수평접합부에 작용하는 수직 하중이 큰 경우 전단 미끄러짐은 Coulomb 마찰에 의해 지배되며, 전단력이 마찰 전단 강도를 넘어서면 급격한 미끄러짐이 일어나게 되므로 충분한 강도의 확보가 중요하다. 수직 개폐 거동이란 횡력에 의해 생긴 전도 모멘트로 인해 수평접합부에서 연속적인 벌어짐(opening)과 닫힘(closing)이 발생하는 현상이다. 접합부에 작용하는 이러한 전도 모멘트는 수직 방향 tie 철근의 인장과 콘크리트의 압축을 통해 저항하므로 적절한 철근량에 의한 연성도의 확보가 중요하다.

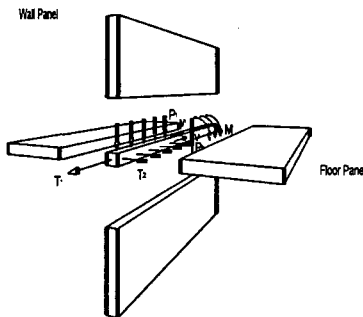


그림 1. 하중전달 메카니즘

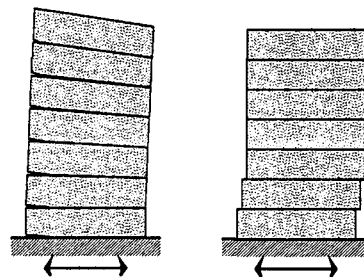


그림 2. 수직개폐 거동과 전단슬립 메카니즘

3. 패널 및 접합부의 해석 모델

3.1 패널의 모델링

패널을 모델링하는 방법에는 쯔보이의 강체모델이나 Powell의 변형보모델 또는 유한요소모델 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 접합부의 점진적인 벌어짐과 접합부 스프링과의 적합성 등을 고려하여 4절점 유한요소를 사용하여 패널을 모델링 했다.

3.2 수평접합부의 모델링

수평접합부의 수치적인 모델링 방법은, 기존의 범용해석 프로그램에서 채택하고 있는 경계면 스프링 요소(contact spring element)의 개념을 접합부 스프링 요소(joint spring element)로 확대한 것으로써 힘-변형 관계를 나타내는 주요 거동 특성을 다음과 같이 분리하여 얻어지게 된다.

1) 수직방향

- 접합계면 사이의 벌어짐 및 접합 모르타르의 압축변형 특성
 - 단부 수직 보강근에 의한 인장-압축 특성
- 2) 수평방향
- 마찰력에 의한 전단저항 특성

위와 같이 분리한 3가지 주변형 인자들에 대한 거동 특성들로 정의되는 각각의 접합부 스프링 요소들을 정의하면,

- 1) 압축요소 : Gap-Compression Joint Spring Element(GCJSE)
- 2) 인장요소 : Steel-Tension Joint Spring Element(STJSE)
- 3) 전단요소 : Simple-Friction Joint Spring Element(SFJSE)

이러한 3가지 접합부 스프링 이외에 부분적인 재료의 악화가 예상되는 곳에 대해서는 재료의 비선형 특성을 효과적으로 나타낼 수 있는 원점회귀요소(OOJSE)를 인장요소나 전단요소에 병렬로 연결하여 사용하였다. 이들 각 요소의 모델링 기법 및 하중-변형 이력특성에 대한 상세한 설명은 “대한건축학회 논문집 제11권 제4호(1995.4)” 및 “한국전산구조공학회 춘계학술발표회 논문집 제 7권 제1집(1995.4)”에서 기술된 바 있다.

4. 동적 해석

4.1 개요

프리캐스트 대형판 구조물이 지진동을 받을 때의 거동 모드는 전단 미끄러짐보다는 개폐(rocking) 거동이 지배적이며, 이 거동에 의해 주로 수평 접합부에서 반복적인 벌어짐과 닫힘이 발생하게 된다. 따라서 이 경우 수평 접합부를 갖는 프리캐스트 구조물의 고유 주기나 층간 전단력의 분포, 전도 모멘트, 층간 상대 변위 등과 같은 동특성치들은 일체식인 경우와 매우 달라지게 된다. 본 연구에서는 조립식 대형 구조물에 대한 다양한 동적 거동특성을 고찰하기 위하여 여러 가지의 지진동 모형을 사용하여 비선형 동적 해석을 수행하였다.

구조 모델은 가상의 Cross Wall System 평면 형태를 갖는 10층 모델을 설정하고 현행 프리캐스트 구조 설계 관행에 따라 부재 배근 한 후, 이 평면 내부에 존재하는 2차원 독립벽체가 연결 슬라브 및 인접 벽체와 완전히 고립된 거동을 하는 것으로 가정하고 전체 건물로부터 이 벽체를 분리하였다. 동적 해석을 위하여 적용한 재료 계수를 비롯한 기타 자료들은 표 1과 같다.

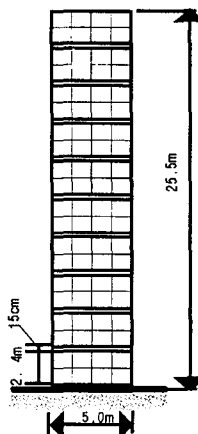


그림 2. 해석 모델

표 1. 부재 성능

특 성		값
판 넬	높이	2.4 m
	폭	5 m
	두께	20 cm
	탄성계수(Ec)	2.806×10^9 ton/m ²
	포아송비(ν)	0.15
	압축강도(f_c)	270 kg/cm ²
접 합 부	길이	15 cm
	두께	20 cm
	탄성계수	2.806×10^9 ton/m ²
	전단계수	1.22×10^6 ton/m ²
인장 철근	압축강도(f_c)	270 kg/cm ²
	탄성계수	2.1×10^4 ton/m ²
	항복강도	4000 kg/cm ²

위와 같은 구조 모델의 동적 해석을 통하여 밝히고자 하는 것은 국내 기준에 대한 내진 성능의 평가로서, 국내 내진 설계 기준치인 0.12g의 최대 지반 가속도를 갖는 3가지 유형의 인공 지진동 모형에 대한 해석을 수행함으로써 프리캐스트 구조물의 내진 안정성을 검토하였다.

4.2 수치 모델의 구성

(1) 질량의 효과

구조물의 질량은 각 절점들에 집중시켰으며, 회전 관성은 고려하지 않았다. 따라서 질량 행렬에서 대각선 밖의 모든 요소와 대각선 요소 중에서 회전 질량에 해당하는 요소는 0이 된다. 질량을 산정할 때의 문제점은 바닥판 질량의 수직 관성을 평가하는 것이다. 만약 바닥판이 강체 거동을 한다면 바닥판의 질량 전체가 움직이겠지만, 실제의 바닥판은 완전한 강체가 아니다. 본 연구에서는 편의상 바닥판을 강체로 보고 수직 질량을 수평 질량과 동일한 값으로 주었다.

(2) 감쇠력의 효과

구조물의 동적 해석에 적용된 감쇠 행렬 C는, 질량 행렬과 강성 행렬에 비례한다고 가정한 Rayleigh의 감쇠를 사용하였다. 본 연구에서는 먼저 감쇠에 관계없이, 해석하고자 하는 구조물에 대한 강성 행렬과 질량 행렬을 구성한 후, SAP90에 의하여 eigen analysis를 수행함으로써 1차모드에서의 주기와 2차모드에서의 주기를 구하여 필요한 감쇠계수 α 와 β 를 얻어내었다. 그 결과를 요약하면 표 2와 같다.

표 2. 구조모델의 고유주기 및 감쇠계수

구조모델	고유 주기		감쇠 계수		비 고
	T1	T2	α	β	
10 층	0.5670	0.1430	1.1769	0.0035	$\zeta=10\%$ 로 가정

4.2.4 시각력 해석을 위한 입력 지진동 모델

본 논문에서는 지진 하중에 대한 프리캐스트 구조물의 거동 특성을 파악하기 위하여 적용된 입력 지진 하중은 모두 3가지 유형이다. 이 중에서 두 가지는 실제로 미국에서 발생한 지진동 이력을 사용하였고, 다른 두 가지는 UMRP(Uniformly Modulated Random Process) 모형에 의하여 최대 지반 가속도가 0.12g에 해당하는(지진 구역 C) 인공지진 이력을 시뮬레이션 한 후, 다시 이들 데이터 1.0g로 스케일링하여 사용하였다. 이에 대한 데이터는 아래와 같다.

(1) Pacoima Dam, S16E component, 1971

$$- a_{peak} = 1.17g \quad \text{at } t = 7.74 \text{ sec}$$

(2) El Centro, N-S component, 1940

$$- a_{peak} = 0.32g \quad \text{at } t = 2.12 \text{ sec}$$

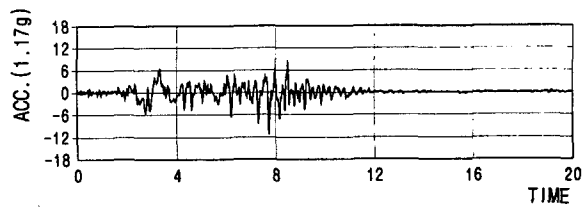
(3) Artificial Earthquake Record 1, 1994

$$- a_{peak} = 1.00g \quad \text{at } t = 2.34 \text{ sec}$$

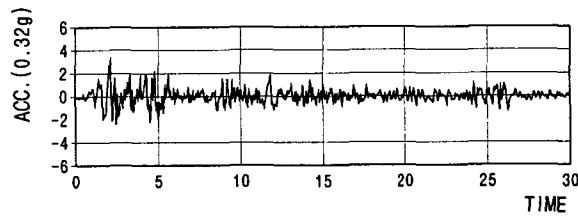
4.3 해석 결과의 고찰

위 구조모델의 동적해석을 통하여 고찰하고자 하는 것은 다음과 같다.

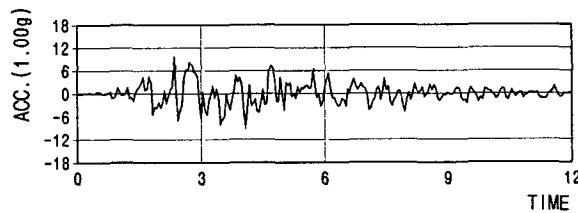
- 1) 층별 마찰전단강도와 최대 전단력의 비교
- 2) 층별 최대 미끄러짐에 대한 고찰



(a) PACOIMA DAM, S16E, 1971



(b) El Centro, N-S, 1940



(c) ARTIFICIAL 1, 1994

그림 3. 입력지진동 이력

3) 개폐거동에 대한 고찰

- 중력에 의한 층별 안정화 모멘트(stabilizing moment)[그림 4]와 최대 전도모멘트 비교
- 층별 최대 벌어짐에 대한 고찰

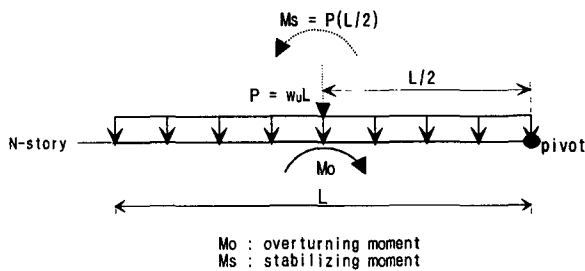


그림 4. 안정화 모멘트(stabilizing moment)의 계산

4.4 해석 결과

(1) 접합부 최대 미끄러짐 및 벌어짐

0.12g의 최대 지진동에 대한 각 층의 접합부에서 발생한 미끄러짐 경향은 3가지 지진동 모두 2층 접합부에서 최대치(평균 0.0036mm)를 나타내었다[그림 5]. 1, 2층을 제외한 상부층에서는 미끄러짐량의 선형적인 감소경향을 보였으며, 하부층 접합부가 다른층에 비하여 상대적으로 취약하지만 전체적으로는 탄성

적인 미끄러짐 거동을 하는 것으로 분석되었다. 층별 벌어짐은 저층부일수록 불리한 결과를 나타내었다 [그림 6]. 또한, 상층부와 저층부의 벌어짐량이 서로 비례하지 않고 저층부에서 현저하게 많이 발생한 것으로 볼 때, 저층부의 전도 모멘트에 대하여 접합부의 벌어짐을 억제하기 위한 요구도가 매우 높음을 알 수 있다.

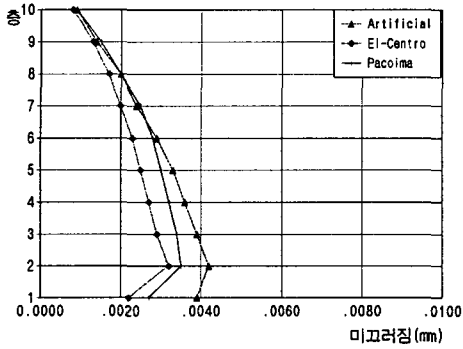


그림 5. 지진동 형태에 따른 수평 접합부의 최대 상대 미끄러짐(10층)

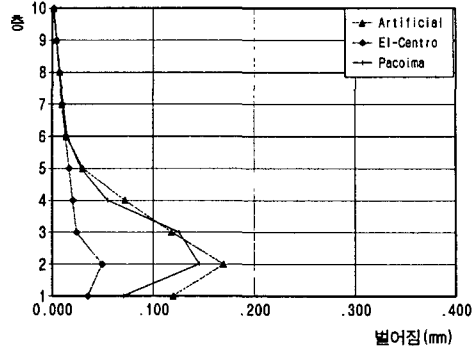


그림 6. 지진동 형태에 따른 수평 접합부의 최대 벌어짐(10층)

(2) 최대 층 전단력 및 전도모멘트

접합부에서의 전단저항은 가장 먼저 마찰저항에 의하여 이루어지게 되므로 일단 이값을 초과하게 되면 미끄러짐이 발생할 가능성이 높아지게 된다. 따라서 중력의 크기가 작은 상층부가 외력에 해당되는 층전단력이 매우 적음에도 불구하고 가장 위험한 것으로 나타났다[그림 7]. 이러한 경향은 그림 8과 같이, 마찰력과 전단력의 비를 조사해 보면 확연히 알 수 있게 되며 이로부터, 상층부로 갈수록 소성발생 가능성이 높아지게 되는 것을 예측할 수 있다. 앞절에서 정의한 안정화 모멘트는 외부 전도 모멘트로 인해 발생하는 개폐(rocking) 거동을 중력에 의하여 억제하는 모멘트로서 이 값을 초과하게 되면 벌어짐이 발생하게 되고, 이에 대하여 인장 철근이 주로 저항하게 된다. 본 해석모델의 경우(스팬 5m), 전체 층에 대하여 지진에 의한 전도 모멘트가 중력에 의한 안정화 모멘트 보다 작은 값을 나타내어 모멘트에 대한 힘의 전달이 탄성적으로 이루어 졌음을 알 수 있다. 그러나 안정화 모멘트의 분포가 1차원 직선임에 비해 전도 모멘트의 분포는 상층에서 저층부로 갈수록 2차원적으로 증가하기 때문에, 구조물 스패인 길어져서 층전도 모멘트의 수준이 높아질 경우 저층부에서 안정화 모멘트를 초과할 가능성이 존재하므로 추후의 연구를 통하여 스패인 길이와 구조물 중력의 변화에 따른 다양한 해석적 고찰이 시도되어야 할 것으로 판단된다.

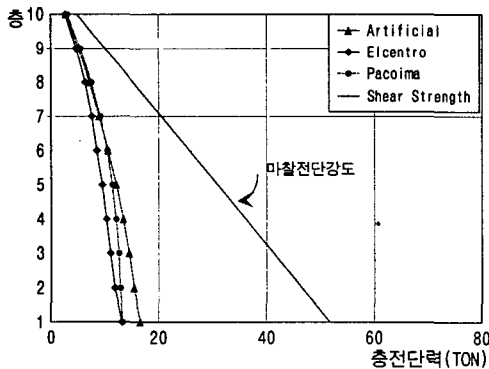


그림 7. 최대 층 전단력의 비교(10층)

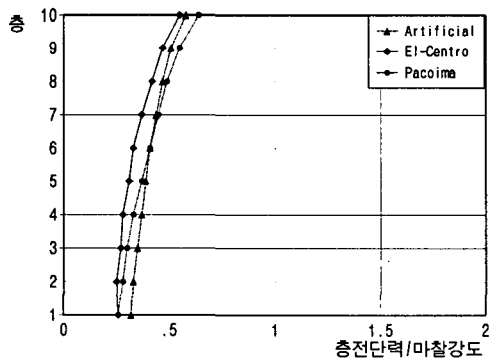


그림 8. 마찰력과 최대 전단력의 비(10층)

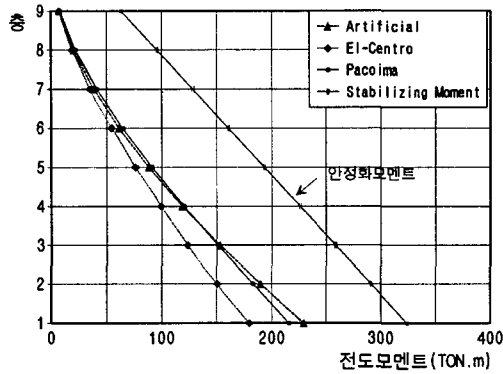


그림 9. 최대 층 전도 모멘트의 비교(10층)

(3) 최대 층 변위 및 응답 이력에 관한 고찰

앞 절의 고찰결과 0.12g 정도의 최대진폭을 갖는 지진동에 대하여 접합부와 패널간에 탄성적인 힘 전달이 이루어지는 것으로 분석되었다. 그러나 이것이 접합부와 패널간의 일체적 거동을 의미하는 것은 아니며 개폐거동으로 인해 접합면에 균등한 응력이 작용하지 못하게 되어 접합부의 강성이 떨어지는 현상이 발생하고 이로 인해 전체 구조물의 응답이 일체적인 경우에 비해 크게 나타나게 된다. 본 절에서는 하중 전달이 탄성적으로 하중전달이 이루어질 때의 전체 구조물의 이력특성을 고찰하기 위하여 SAP90의 해석결과와 비교함으로써 접합부 스프링 모델의 적합성을 검증하고, 수평접합부를 고려하지 않았을 때 나타나는 결과치의 차이를 관찰하고자 하였다.

해석에 사용된 모의 지진동은 El-Centro 0.12g 타입만을 사용하였고 다음의 3가지 경우에 대하여 그 결과를 비교하였다.

CASE 1 : PCNA(본 연구에서 개발한 스프링 모델)

CASE 2 : SAP90(강성을 저감시킨 수평 접합부 포함)

CASE 3 : SAP90(접합부를 포함하지 않음)

case 2의 경우 수평 접합부의 저감된 재료 성능은 다음과 같다.

i. 탄성계수(E) : 판넬의 45 %로 저감⁽²⁾

$$E' = 0.45E = 0.45(2100000) = 945000 \text{ ton/m}^2$$

ii. 전단계수(G) : 판넬 전단계수의 6% 적용⁽²⁾

$$G' = 0.06G = 0.06(913043) = 54780 \text{ ton/m}^2$$

- 최대 층 변위와 층간 상대변위

구조물 스패 중앙부의 최대 층 변위[그림 10]는 case 1과 case 2는 10층에서 각각 9.89mm, 9.74mm 로 나타났고 전체 층에 대하여 매우 근접한 결과를 보였으며 case 3는 8.84mm로서 case 1의 89% 정도로 약간의 차이를 나타내었다. 이러한 결과는 비록 접합부의 유무에 의한 구조물 강성의 차이로 인한 것이나, 탄성 범위에서는 단부 벌어짐 및 전단 슬립으로 인한 접합부 강성의 저감 효과가 층 변위량에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 분석되어 진다.

- 응답 이력에 관한 고찰

최상부 변위 이력 및 밀면 전단력에 대한 이력의 최대 진폭 구간은 3가지 case 모두 2초에서 5초 사이

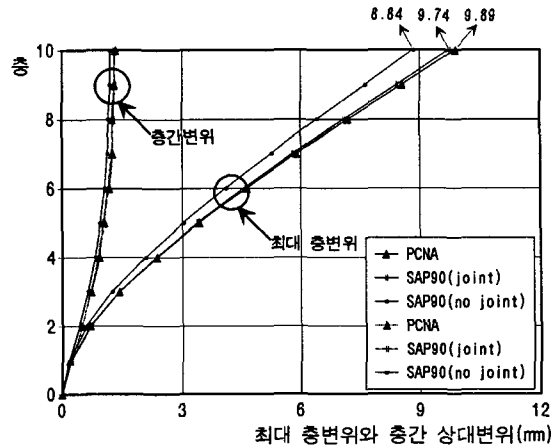


그림 10. 최대 층 변위 및 중간 상대변위(10층, El-Centro 0.12g)

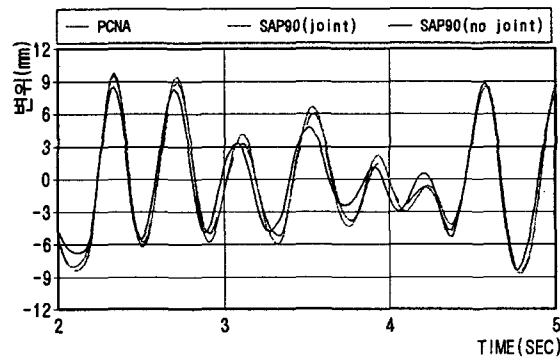


그림 11 최상부 변위 이력(10층, El-Centro 0.12g, 2~5초)

에 발생하였다. 해석 결과[그림 11], 전체 시간대에 걸쳐서 접합부 스프링 요소를 사용한 case 1과 접합부를 고려한 case 2는 응답 이력이 거의 일치하였으나 접합부를 고려하지 않은 case 3의 경우는 구조물 강성이 커서 상대적으로 진폭들이 작고 응답 주기 역시 작아지는 경향을 보였다.

5. 결 론

1. 인공 모의지진동에 대한 해석결과 저층부에서 최대 미끄러짐이 발생하고 상층부로 갈수록 선형적인 감소경향을 나타내나, 층 전단력과 마찰력의 비를 검토한 결과 상층부로 갈수록 소성발생 가능성이 높아지는 것으로 분석되었다.
2. 접합부 벌어짐량의 발생 경향은 상층부에서 하부층으로 가면서 서로 비례적으로 증가하지 않으며 하부층에서 큰 범위의 벌어짐이 발생하는 것으로 나타났다.
3. 국내 내진설계 규준에 입각하여 구조설계된 프리캐스트 해석모델의 최대 예상 지진동(0.12g)에 대한 내진성능을 분석한 결과, 주요 변형 메카니즘인 미끄러짐과 벌어짐에 대하여 모두 탄성범위내에서 거동하였으며 수평접합부를 통한 힘의 전달도 과도한 응력의 집중없이 효과적으로 분포되었다.
4. 전단의 경우 상층부에서 층 지진력이 마찰력을 초과할 가능성이 매우 높아 마찰전단 이외의 소요전

단 내력을 확보할 수 있는 접합부 상세가 필요하다.

5. 전도모멘트에 대한 분석 결과 저층부에서 벌어짐 발생 가능성이 크며 따라서, 수직인장 보강근의 배근시 상당한 안전율을 확보해야 할 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 프리캐스트 콘크리트 조립식 구조설계기준 및 해설, 1992.
2. 정일영, 송진규, 강해관, "반복하중을 받는 프리캐스트 대형 판넬 구조물의 수평 접합부 비선형 해석에 관한 연구," 대한건축학회 논문집 제11권, 제4호, 1995.4., pp 223-232
3. 정일영, 최완철, 송진규, 강해관, "수평접합부의 비탄성 특성을 고려한 프리캐스트 대형판넬 구조물의 비선형 해석에 관한 연구," 한국전산구조공학회 춘계학술발표회 논문집 제7권 제1집, 1995.4., pp 45-52
4. Amin, E.K and Powell, G.H., "General Purpose Computer Program for Inelastic Dynamic Response of Plane Structures," UBC/EERC-73/6, University of California, Berkeley, April 1973.
5. Clough, R.W., Malhas, F. and Oliver, M.G., "Seismic Behavior of Large Panel Precast Concrete Walls: Analysis and Experiment," PCI Journal, Sept./Oct., 1989., pp 42-66