

반복하중을 받는 대형 콘크리트 판구조의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Large Concrete Panel Structures subjected to Cyclic Loads

정 봉 오* 서 수 연** 이 원 호*** 이 리 형****
Jeong, Bong-Oh Seo, Soo-Yeon Yi, Waon-Ho Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

Large Concrete Panel Structures behave quite differently from frame or monolithic shear wall structures because of the weakness of joint in stiffness and strength. The joint experiences large deformation such as shear-slip in vertical and horizontal joint and rocking and crushing in horizontal joint because of localized stress concentration, but the wall panels behave elastically under cyclic loads.

In order to describe the nonlinear behavior of the joint in the analysis of PC structures, different analysis technique from that of RC structures is needed.

In this paper, for analysis of large concrete panel subassembly subjected to cyclic loads, the wall panels are idealized by elastic finite elements, and the joints by nonlinear spring elements with various load-deflection relationship.

The analytical results are compared with the experimental results on the strength, stiffness, energy dissipation and lateral drift, and the effectiveness of this computer analysis modelling technique is checked.

1. 서 론

대형 콘크리트 판구조는 지진 또는 풍하중과 같은 반복하중이 작용하면 벽판넬에 비해 상대적으로 강도와 강성이 낮은 접합부가 불연속면으로 변하여 건물 전체의 비선형 거동을 지배하게 되며, 일체식 구조와는 상당히 다른 거동을 하게 된다. 이는 취약한 접합부에 국부적인 응력집중이 발생함으로써 수평접합부와 수직접합부의 전단 미끄러짐, 수평접합부의 들림과 그라우트의 압괴등이 발생하여 벽체의 휨강성과 전단강성을 국부적으로 변화시키며, 대부분의 변형은 접합부에서 발생하고 벽판넬은 상대적으로 탄성적 거동을 하게 된다.

따라서, 대형 콘크리트 판구조의 해석시에는 일체식 전단벽 구조와는 달리 접합부의 거동을 적절히 묘사할 수 있는 해석모델의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 일정한 축력하에서 반복 수평하중을 받는 대형판 부분구조로서 수평접합부의 압괴 및 들림거동으로 최종파괴된 1개층 실험체와 수직, 수평접합부의 전단 미끄러짐 거동으로 파괴된 3개층 실험체를 대상으로 비선형 해석 프로그램인 DRAIN-2DX[1]를 이용하여 접합부를 다양한 하중-변위 관계를 갖는 1차원 스프링으로 모델링하고, 벽판넬은 4절점 탄성유한요소로 이상화하여 해석을 실시하였다. 해석결과와 실험결과를 각 구간의 강도, 강성 및 에너지 소산성능, 횡변위 등을 비교 분석하여 해석 모델의 적용가능성을 평가하고, 이를 토대로 동적해석을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

* 한양대 건축공학과 석사과정
** 한양대 건축공학과 박사과정
*** 광운대 건축공학과 조교수
**** 한양대 건축공학과 교수

2. 실험

2.1 해석대상 실험체 개요[2,3]

해석대상 실험체는 24층 아파트의 최하부 1개층 및 3개층을 1/2 축소 모델로 제작한 실험체로서 웨브 벽판넬과 플랜지 벽판넬 및 슬래브판넬로 구성되어 있으며, 상·하 벽판넬의 연결부인 수평접합부는 조인트 박스를 통해 수직보강철근을 연결하고 콘크리트를 충전한 쐐기형 접합이고, 좌우 벽판넬의 연결부인 수직접합부는 루프철근으로 연결후 모르터를 충전한 전단키 접합이다. 상세한 실험체 일람은 표 1과 같으며, 실험체 형상 및 접합부 형식은 그림 1~3과 같다.

표 1 실험체 일람

실험체 명	높이	길이	사 용 철 근				조인트 박스	전단키	축응력 (kg/cm ²)
			벽체	슬래브	L. B.	V. T. B.			
QB1-20	1300	1320	φ3-100x100	-	φ 5	HD13	65x77.3x3.5-1.2	70x70	28.03
QB3-20	3900	4000	φ3-100x100	φ6@150 φ5@150	φ 5	HD13	65x77.3x3.5-1.2	70x70	26.00

* QB1-20:1개층 실험체 QB3-20:3개층 실험체 * L. B.:루프철근 V. T. B.:수직보강철근

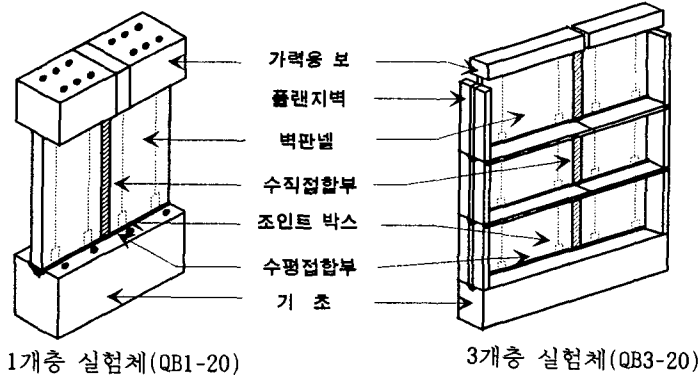


그림 1. 실험체 형상

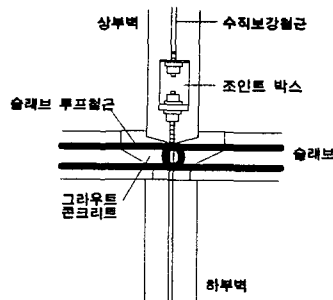


그림 2. 수평접합부 형식

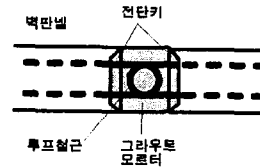


그림 3. 수직접합부 형식

2.2 실험방법 및 결과

실험체에 작용하는 축력은 단면의 축소율에 따라 축소하여 벽판넬 상부 가력용보에 등분포하중이 작용하도록 2개의 ACTUATOR로 일정하게 가력하였으며, 횡력은 가력용보의 중심선을 따라 단계별로 2사이클씩 점중 반복가력하는 변위조절 방식으로 하였다.

실험결과 1개층 실험체인 QB1-20실험체의 초기균열은 수평접합부에서 발생하였으며, 주요 파괴 형상은 수평접합부의 압괴와 인장축 조인트 박스의 파괴에 따른 수평접합부의 들림으로 나타났다. 수직접합부는 일부 균열이 발생하였지만 거의 일체로 작용하였다.

3개층 실험체인 QB3-20실험체의 초기균열은 수직접합부에서 발생하였으며, QB1-20 실험체와는 달리 주요파괴 형상은 수평, 수직접합부의 전단 미끄러짐과 최대하중 이후 벽판넬의 사압괴로 나타났다.

3. 2차원 유한요소 해석

접합부는 전단미끄러짐, 압괴, 들림 거동을 적절히 묘사할 수 있는 비선형 스프링으로 구성하며, 웨브 벽판넬 및 플랜지 벽판넬은 2차원 평면응력요소로 이상화 하였다. 해석대상 실험체의 모델링은 그림 4와 같다.

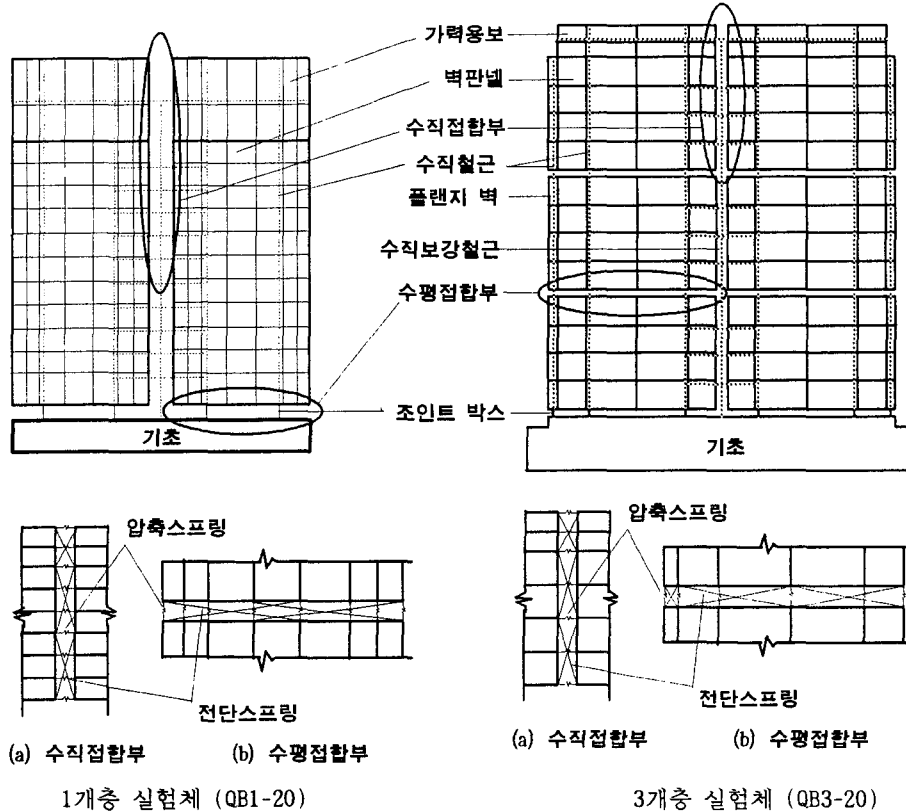


그림 4. 대상 실험체 모델링

3.1 해석상의 가정

해석을 위한 가정조건은 다음과 같다.

- 1) 벽체는 2D구조이며, 기초는 강체이다.
- 2) 판넬은 선형탄성거동을 하며, 접합부만 비선형 거동을 한다.
- 3) 접합부의 변형모드는 수직, 수평접합부의 미끄러짐, 수평접합부의 들림, 압괴만을 고려한다.
- 4) 구조체의 자중은 각 절점에 집중시키고, 수직관성 효과만을 갖는 것으로 한다.
- 5) 바닥 슬래브의 격막효과(Diaphragm Effect)는 접합부의 탄성계수 산정시만 고려한다.

3.2 구성부재의 이상화

(1) 벽판넬

벽판넬은 한 요소에 4절점 8자유도를 갖는 평면응력요소로서 주변형 모드는 신장, 휨, 전단 변형 모드 및 강체변형 모드를 갖는 탄성 유한요소로 이상화하였다. 3개층 실험체인 QB3-20 실험체에서는 플랜지 벽판넬은 유효두께를 고려하였으며, 벽체에 배근된 철근은 탄-소성 거동을 하는 트러스 요소로 이상화하였다.

(2) 수평접합부

1) 그라우트의 압괴

수평접합부 그라우트는 압축시 유한 강성을 가지며, 인장시에는 강성이 "0"으로서 틀벌어짐이 발생하는 압축스프링으로 이상화 하여, 상부로 부터 전달되는 압축력에 의한 수평접합부의 압

괴를 고려하였다. 하중-변형 관계는 Karson & Jirsa[4]의 반복하중을 받는 콘크리트 재료모델을 응용하여 그림 5와 같이 모델링하였다.

접합부 최대내력은 이리형 등[5]이 제안한 식(1)을 사용하였다.

$$P_U = \phi f_g t_g L \frac{1}{K} \quad (\phi = 0.7) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, f_g : 그라우트의 압축강도
 f_s : 슬래브의 압축강도
 t : 벽 두께
 t_g : 그라우트의 폭
 L : 수평 접합부 길이
 K : 하중전달계수

$$K = \alpha \frac{1}{\left(\frac{f_s}{f_g}\right) \left\{ \left(\frac{t}{t_g}\right) - 1 \right\} + 1}$$

α 는 실험상수로서 1.0이며, $K \leq 1$ 임.

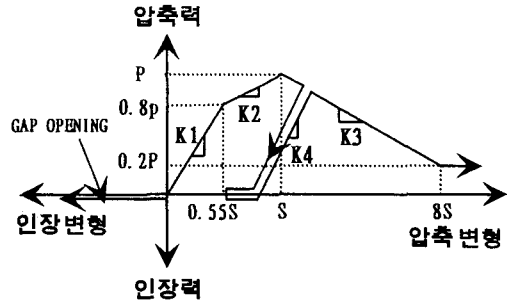


그림 5. 압축스프링 모델

또한, 탄성계수는 시공성 및 건조수축 등으로 인한 강도저하를 고려한 유효탄성계수를 사용하였으며, 유효탄성계수는 Lewicki[6]가 제안한 식(2)를 사용하였다.

$$E_{c,eff} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{\frac{t_1}{E_A} + \frac{t_2}{E_B} + \frac{t_3}{E_C}} \dots\dots\dots (2)$$

- ① Column A, C의 탄성계수 ② Column B의 탄성계수

$$E_A = E_C = \frac{t_c + t_s}{t_c / (2/3E_c) + t_s / E_{st}^*}$$

$$E_B = (2/3)E_c$$

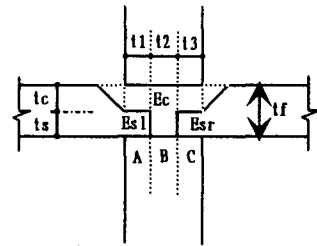


그림 6. 수평접합부

상기 식(2)에서 계수 2/3는 건조수축의 영향을 고려한 계수이며, 바닥슬래브의 격막효과(Diaphragm Effect)를 고려한 바닥슬래브의 탄성계수 E_{st}^* 은 다음식으로 구한다.

$$E_{st}^* = \frac{t_1 + 0.25t_f}{t_1} E_{st}$$

2) 전단 미끄러짐

수평접합부의 전단저항은 탄-소성 거동을 하는 X자형 비선형 스프링으로 이상화하였다. 강도식은 전단마찰 메커니즘에 의한 식(3)을 사용하였으며, 마찰계수 μ 는 반복하중시에 대해 Brankov & Sachanski[7]가 제안한 0.4를 사용하고 부착력은 무시하였다. 전단강성은 CEB-FIB CODE에서 제안한 식(4)에 의한 평균강성을 사용하였다.

$$V_s = C + \mu(N + A_s f_y) \dots\dots\dots (3)$$

여기서, C : 부착력
 N : 축력
 μ : 마찰계수

$$K_s = 50 \tau A_j = 50 V_s \dots\dots\dots (4)$$

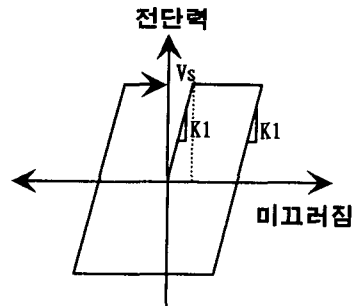


그림 7. 수평접합부 전단스프링 모델

(3) 수직접합부

수직접합부의 하중-변위 곡선은 전단키의 형상, 루프철근비, 접합부 충전모르터의 압축강도,

하중조건 등에 영향을 받게되며, 전형적인 전단키의 하중-변위곡선은 그림 8과 같다. 일본 건축학회 보고서[8]에 의하면 ①에서 전단키에 균열이 발생하며, 균열발생하중은 식(5)와 같고, 각 구간의 변형은 표 2와 같이 보고하였다.

$$V_{cr} = 0.09 A_k f_g \dots\dots\dots (5)$$

여기서, A_k : 전단키의 전단면적
 f_g : 접합부 충전재의 압축강도

표 2 전단키의 변형 (단위:mm)

구 분	δ_1	δ_2	δ_3
변형량	0.05	0.5	5 이상
	~	~	5 이상
	0.07	1.5	

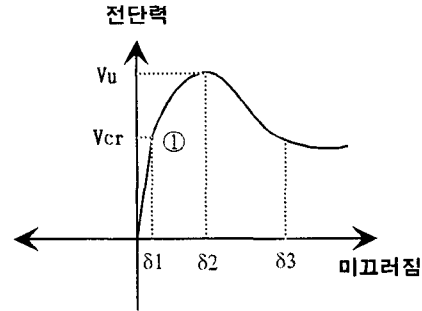


그림 8. 전단키 접합부의 하중-변위 곡선

수직접합부의 전단저항은 X자형 비선형 스프링으로 이상화하고 하중-변형관계는 그림 9(a)와 같이 균열발생전까지는 완전 탄-소성 거동을 하는 단순 마찰요소와 전단키의 균열발생이후 강도저하를 고려하여 그림 9(b)와 같이 작용하는 전단키 요소를 조합하여 전단저항을 이상화하였다. 최대내력식은 이리형 등[9]이 제안한 식(6)을 사용하였다.

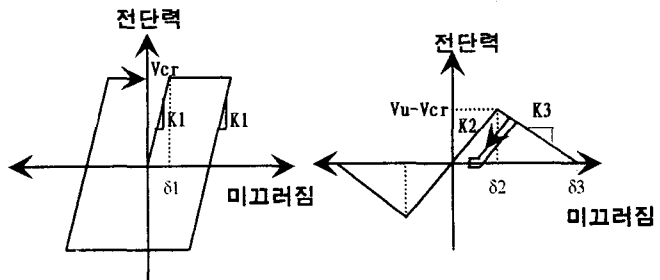
$$V_u = \phi(A_k \cdot f_g \sqrt{(0.494 - 0.955 \eta) 0.955 \eta}) \dots\dots (6)$$

$$\eta = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{gu}} < 0.097$$

$$V_u = \phi(0.119 A_k \cdot f_g + 0.764 A_s \cdot f_y)$$

$$\eta = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{gu}} \geq 0.097$$

여기서, A_k : 전단키의 단면적
 f_g : 그라우트의 압축강도
 A_s : 횡보강근의 단면적
 f_y : 횡보강근의 항복강도
(단, f_y 는 2400 kg/cm² 이하)



(a) 단순 마찰 요소 (b) 전단키 요소

그림 9. 수직접합부 전단스프링 모델

또한, 수직접합부의 압축 스프링은 수평접합부와 동일한 하중-변형 관계를 갖는 스프링으로 이상화하였다.

(4) 조인트 박스 및 루프철근

조인트 박스 및 루프철근은 탄소성 거동을 하는 트러스 모델로 이상화하였으며, 조인트 박스의 위치는 벽판넬을 탄성 유한요소로 모델링하였기 때문에 수평접합부에 위치하는 것으로 가정하였다.

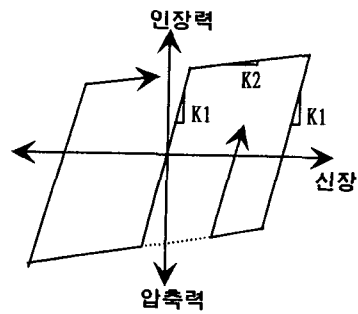


그림 10. 트러스 모델

4. 해석결과와 실험결과와의 비교

이상과 같은 모델링을 통해 유한요소 해석을 실시하여 얻은 해석결과와 실험결과와의 비교를

표 3. 강도, 강성, 에너지소산능력에 대한 실험결과와 해석결과와의 비교표

구분		1 δ_y		3 δ_y			5 δ_y			7 δ_y			
		EXP	CAL	EXP	CAL	EXP	EXP	CAL	EXP	CAL	EXP	CAL	
1층	STR	12.5	11.8	1.06	20.6	20.1	1.02	21.1	21.2	0.99	21.1	21.0	1.01
	STF	79.1	77.1	1.03	38.0	36.6	1.04	24.4	26.0	0.94	17.0	16.8	1.02
	ENE	12.0	6.0	1.50	75.9	61.0	1.26	144.3	117.0	1.23	228.7	160.0	1.43
3층	STR	38.6	38.5	1.00	61.3	58.0	1.06	66.6	62.4	1.07	66.7	66.6	1.00
	STF	236.5	223.9	1.06	131.2	124.3	1.06	83.7	81.5	1.03	60.3	59.0	1.02
	ENE	19.0	40.0	0.50	219.0	347.5	0.63	627.4	764.7	0.82	965.2	1214.0	0.80

* 1층:1층실험체, 3층:3층실험체, STR: 강도(t), STF: 강성(t/cm), ENE: 에너지소산면적(t.mm)

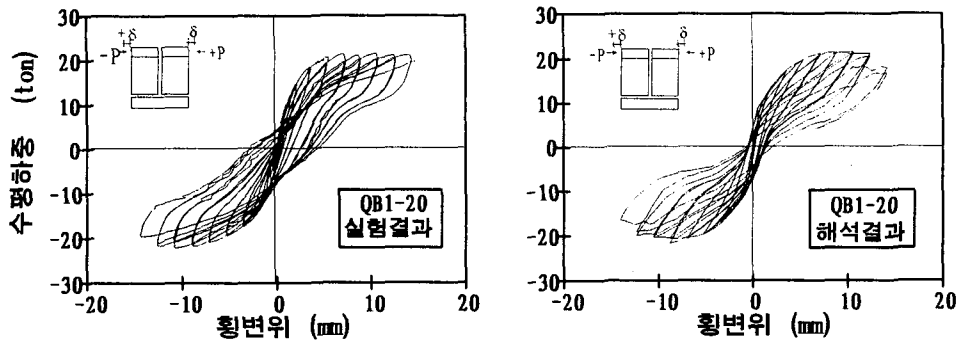


그림 11. 1개층 실험체(QB1-20)의 하중-변위 곡선

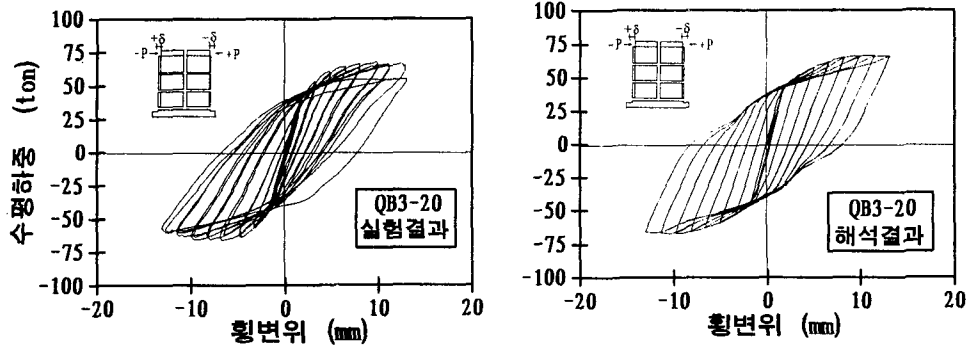


그림 12. 3개층 실험체(QB3-20)의 하중-변위 곡선

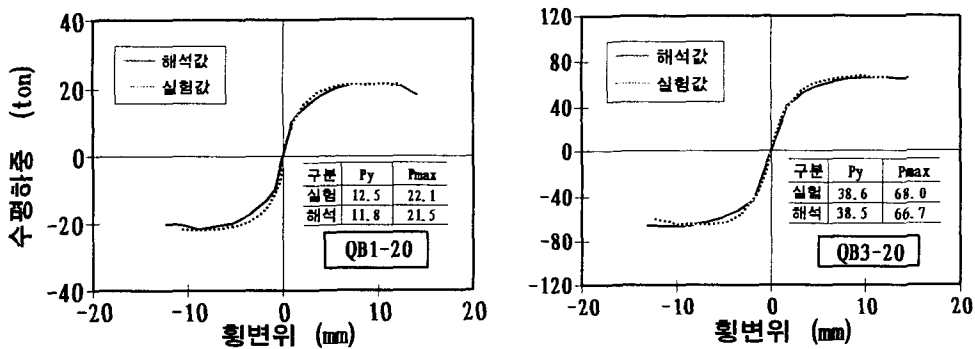


그림 13. 강도 변화 곡선

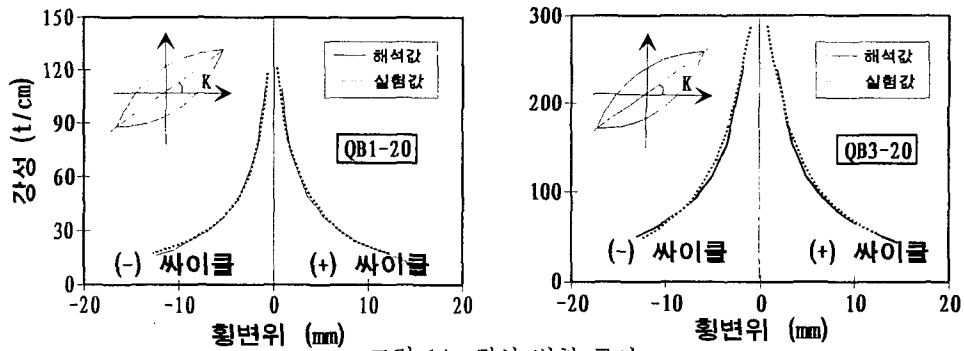


그림 14. 강성 변화 곡선

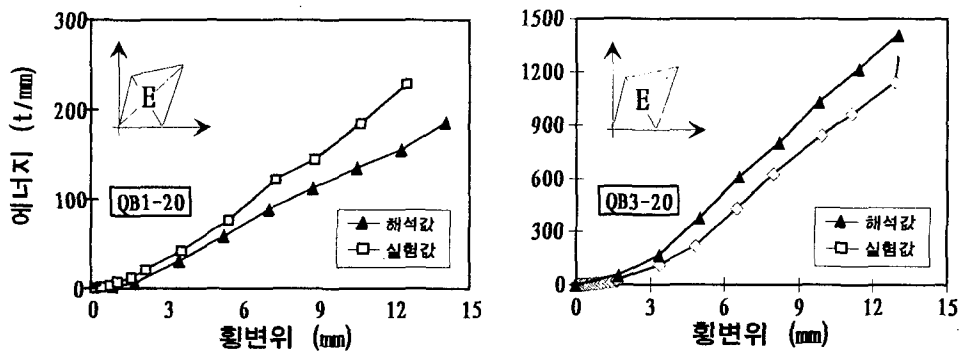


그림 15. 에너지 소산면적 비교 곡선

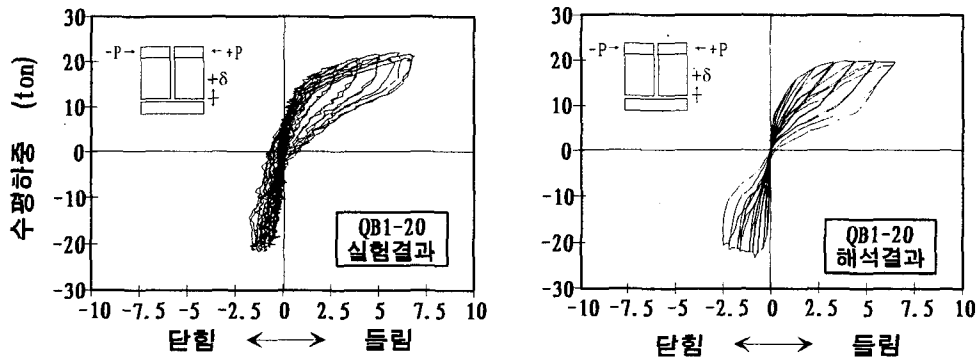


그림 16. 1개층 실험체의 하중-들림 곡선

표 4. 3층 실험체의 층변위 (단위: mm)

층 수	부재항복시		최대하중시	
	실험	해석	실험	해석
1층 바닥	0.03	0.02	0.05	0.68
2층 바닥	0.36	0.48	4.07	4.42
3층 바닥	0.78	0.96	7.31	7.82
가력용보	1.61	1.63	9.70	9.80

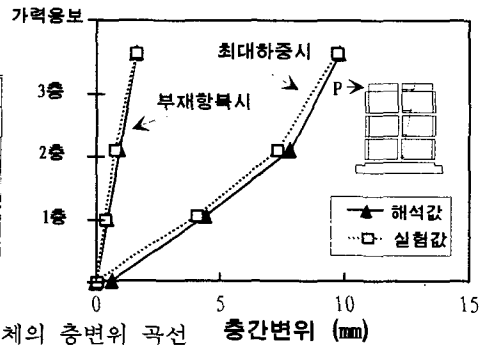


그림 17. 3개층 실험체의 층변위 곡선

표 3에 나타내었다.

4.1 하중 - 변위 곡선

그림 11 및 그림 12에서 보는 바와 같이 하중-변위 포락곡선은 실험결과와 해석결과가 대체적으로 잘 일치하고 있으며, 그림 13과 그림 14의 강도 및 강성 비교로부터 알 수 있듯이 강도와 루프강성은 전체적으로 10%내외의 차이를 보이고 있어 실험결과와 좋은 대응을 보이고 있다. 다만, 수평접합부의 들림거동이 지배적으로 작용한 1층 실험체인 QB1-20실험체에서는 실험결과보다 핀칭현상이 다소 많이 발생하고 있다. 이는 해석시 제하강성을 충분히 고려하지 못하였기 때문으로 사료된다.

4.2 에너지 소산면적 비교

하중-변위 곡선으로 둘러싸인 면적으로 구한 각 사이클별 에너지 소산면적의 비교는 그림 15와 같다. 수평접합부의 들림거동으로 파괴한 1층 실험체에서는 해석결과가 핀칭현상으로 인해 낮게 나타났으며, 접합부의 미끄러짐 거동으로 파괴한 3층 실험체에서는 20%가량 높게 나타났다.

4.3 수평접합부 들림 비교

들림이 지배적인 1층 실험체의 수평하중에 대한 우측 벽판넬의 들림거동은 그림 16에서와 같이 실험결과와 좋은 대응을 보이고 있다.

4.4 층변위 비교

접합부의 미끄러짐으로 최종파괴한 3층 실험체의 부재항복시와 최대하중시에 대한 각층 바닥의 횡변위를 그림 17 및 표 4에 나타내었다. 부재항복시 및 최대하중시의 층변위가 해석결과와 실험결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결론

이상과 같이 접합부를 다양한 하중-변형 관계를 갖는 스프링으로 이상화하여 유한요소 해석을 실시하고, 해석결과와 실험결과를 비교·분석한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 하중-변위 곡선의 강도와 루프강성을 비교한 결과 10%내외의 차이로 실험결과와 잘 일치하고 있어 포락곡선 (ENVELOPED CURVE)의 예측이 가능하리라 사료된다.
- 2) 접합부의 들림 거동과 각 층변위 역시 실험결과와 좋은 대응을 보이는 것으로 나타나 본 해석 모델의 적용성을 보이고 있다.
- 3) 에너지 소산성능을 비교한 결과 20%내외의 차이를 보이고 있으나, 향후 부재의 모델링시 제하강성을 수정 보완한다면 대형 콘크리트 판구조의 이력거동을 보다 정확히 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] V.Prakash, G.H.Powell, S.Campbell, "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide", 1994.
- [2] 박병순, 서수연, 이원호, 이리형, "반복하중을 받는 대형 콘크리트 판구조의 이력거동에 관한 연구 -1층 부분 구조체의 거동에 관하여-", 대한건축학회 논문집, 제10권 3호, 1994.3, pp.127-137.
- [3] 서수연, 박병순, 김성수, 이봉호, 이원호, 이리형, "반복하중을 받는 대형 콘크리트 판구조의 이력거동에 관한 실험적 연구 -3층 대형판 구조체 실험결과를 중심으로-", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제4권 제2호, 1992.10, pp.179-184.
- [4] M.Y.H.Bangash, "Concrete and Concrete Structures:Numerical Modeling and Applications".
- [5] 서수연, 정봉오, 이원호, 이리형, "대형 콘크리트 판넬구조 수평접합부의 지지력 성능에 관한 연구", 한국 콘크리트학회 논문집, Vol.6, No.2, 1994.5.
- [6] Comite Euro-International Du Beton (1985).
- [7] Brankov,G.,Sachanski,S.,"Response of Large-Panel Buildings for Earthquake Excitation in Nonelastic State", Sixth World Conference on Earthquake Eng, India, Jan.1977
- [8] 日本建築學會, "壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法"
- [9] 서수연, 이원호, 이리형, "대형 콘크리트 판넬구조의 수직접합부 전단강도에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, Vol.6, No.1, 1994.2, pp.111-119