

반복 횡하중을 받는 프리캐스트 대형 판구조의 내진성능에 관한 연구

Seismic Performance of Precast Concrete Large Panel Structures
Subjected to Horizontal Cyclic Loading

서수연*

Seo, Soo-Yeon

이리형**

Lee, Li-Hyung

Abstract

The seismic performance of precast concrete panel structures tested previously has been evaluated in this paper. Hysteretic curves of test specimens are idealized to elasto-plastic curves to get reliable yielding and ultimate displacements. For the idealized curves, ductility and energy dissipation capacity of specimens have been evaluated using a few guide lines. In addition, the strength capacity of specimens is checked for the strength demand caused by the design earthquake load including overturning moment effects.

The result shows while the strength of specimen with joint box for vertical continuity is little bit lower than that of specimen connected by welding, the ductility of the former is higher than that of the latter. The energy dissipation ratios of PC specimens are ranged from 83% to 96% of that of RC specimen and the average of those are shown 90%.

Key words : seismic performance, precast concrete panel structures, elasto-plastic curve, ductility, energy dissipation capacity

1. 서론

건물의 내진성능은 구조형식, 층수 및 크기, 사용재료, 지반 등과 같은 많은 요인에 의해서 영향을 받게 된다. 현재까지 이를 규명하기 위한 많은 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 최근에는 구조물의 성능에 근거한 설계기법¹⁾이 제시되어 있는 상황이다.

또한, 구조실험상의 오차를 줄이고, 보다 신뢰성있는 결과를 확보할 뿐만아니라, 그 결과를 객관적으로 평가하기 위한 실험 가이드 라인²⁾도 최근 정립되어 있다.

본 연구에서는 실험된 대형 콘크리트 판 구조의 연구결과³⁾를 분석하여, 그 내진성능을 평가하고자 한다. 성능의 평가를 위해서 최근 FEMA⁴⁾에서 제정한 가이드 라인을 이용한다. 또한, 실험

* 정회원, 한양대학교 STRESS 연구조교수

** 정회원 광운대학교 건축공학부 교수

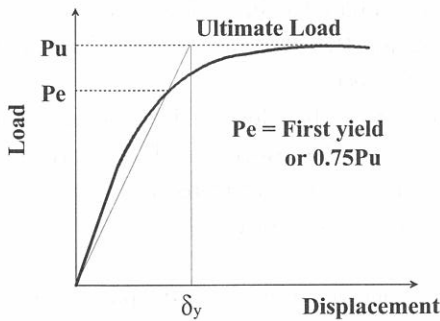
• 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

결과의 보다 객관적인 평가를 위해 Park⁵⁾에 의해 제시된 항복과 극한점의 결정방법을 이용하고, 최근 ACI에서 연구된 실험기준²⁾을 이용한다. 마지막으로 실제 대상으로 한 건물에 작용하는 설계전단력과 실험결과를 비교하여 프리캐스트 콘크리트 대형판 구조의 내진성능을 평가하며, 실험체의 거동특성을 고려하여 내력을 평가한다.

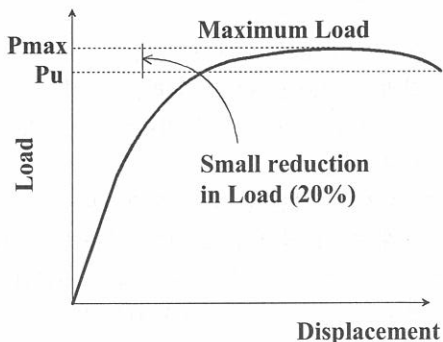
2. 탄소성 모델에 의한 평가

2.1 연성의 평가

지진설계에서 "연성(Ductility)"은 부재가 지나친 강도의 저하없이 반복된 비탄성변형을 경험할 수 있는 성능을 말하며, 그 값은 최대변위와 항복변위의 비로 표현한 연성비로 나타내진다. 부재의 항복변위는 콘크리트에 초기 균열이 발생한 이후,



(a) 항복점의 정의



(b) 극한하중의 정의

Fig. 1 항복점 및 극한하중의 정의

부재내에 있는 인장철근이 항복한 시점으로 일반적으로 정의 되지만, 그 값의 정확한 결정이 쉽지 않다. 항복변위가 잘못 정의된 경우, 연성비는 큰 오차를 보이기 때문에, 비교적 정확한 값을 구하기 위해서는 객관적인 평가가 요구된다.

본 연구에서는 Park⁵⁾에 의해 정의된 탄소성 모델을 이용하고 각 실험체의 하중-변위 곡선을 탄소성의 2개 선분 모델로 이상화하여 실험체의 성능을 평가한다. Fig. 1은 Park에 의해 정의된 부재의 항복 및 극한하중을 나타내며 Fig. 2는 대상 실험체의 하중-변위곡선에서 각 단계의 최대하중을 연장해서 이은 강도변화 곡선을 나타낸다.

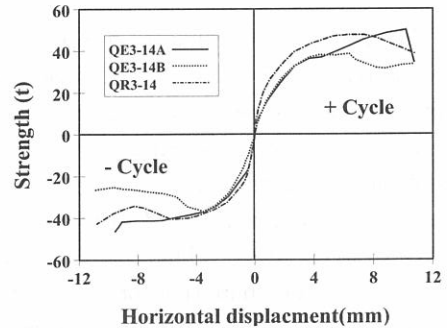


Fig. 2 실험체의 강도변화곡선

Table 1은 상기 곡선을 Fig. 1에 따라 정의한 항복 및 극한하중, 변위, 탄성강성을 나타낸다. 각 실험체의 탄소성 곡선을 나타내면 Fig. 3과 같다. Table 1 및 Fig. 3으로부터 QE3-14B (PC 실험체, 상하벽을 조인트박스 연결) 및 QR3-14 (RC 실험체)가 각각 8.43, 7.40로 나타났으나, QE3-14A 실험체 (PC 실험체, 상하벽을 용접으로 연결)는 다소 낮은 4.58로 나타났음을 알 수 있다. 탄성강성은 QR3-14 실험체가 가장 높으며, QE3-14A 실험체 및 QE3-14B 실험체는 각각 QR3-14 실험체의 67%, 72%로 나타났다. QE3-14A 실험체는 높은 내력과 함께 항복변위가 다른 실험체에 비하여 큰 것으로 나타나, 상대적으로 연성비가 낮게 나타났다.

Table 1. 실험체의 항복 및 극한하중

실험체 명	P_m (t)	$0.8P_m$ (t)	δ_y (mm)	δ_m (mm)	μ
QE3-14A	50.2	40.16	2.30	10.54	4.58
QE3-14B	38.6	30.88	1.64	13.82	8.43
QR3-14	47.7	38.16	1.46	10.8	7.40

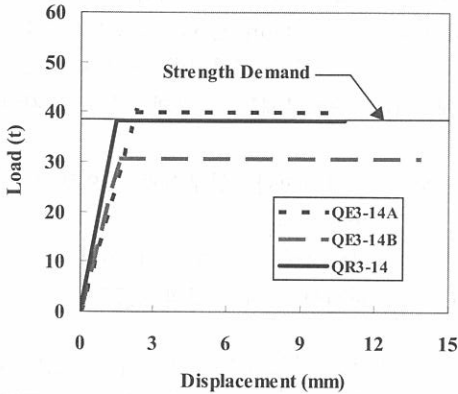


Fig. 3 실험체의 탄소성 곡선

2.2 실험체 강도(Strength)의 평가

본 연구에서 대상으로 하는 실험체는 실제 15층 건물의 한 부위를 모델링한 것이다³⁾. 이 실험체의 보유강도를 실제 건물에 작용하는 하중, 즉 규준^{6,7)}으로부터 요구되는 강도 요구치(Strength demand)에 대하여 평가하였다.

대상건물에 대한 탄성해석결과, 실험에서 대상으로 한 벽체에 작용하는 밀면전단력은 10.76t으로 나타났다. 그러나, Fig. 4와 같이 나타낸 바와 같이 실제 벽체에 작용하는 힘은 이외에도 횡력에 의한 전도모멘트가 있으며, 이에 의해서 실험체에 실제 요구되는 강도요구치는 증가하게 된다. 이를 구하는 식을 정리하면 다음과 같다.

$$V_E h_e = M_E \quad (1)$$

$$V_E = K \sum_{i=1}^{15} V_i \quad (2)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{15} V_i h_i \quad (3)$$

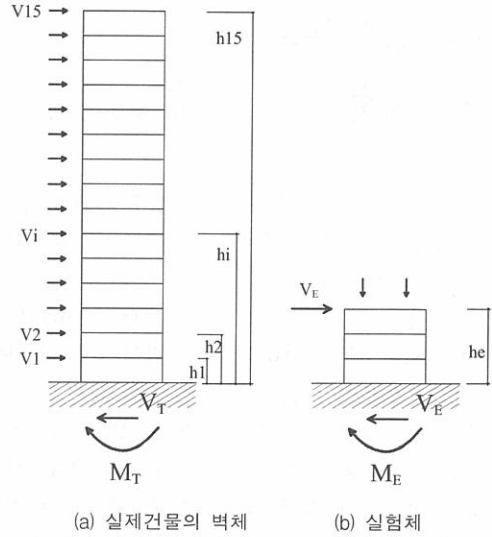


Fig. 4 전도모멘트 효과

$M_E = M_T$ 가 되기 위해서 요구되는 V_E 를 구하면,

$$K \sum_{i=1}^{15} V_i h_e = \sum_{i=1}^{15} V_i h_i \quad (4)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{15} V_i h_i}{\sum_{i=1}^{15} V_i h_e} \quad (5)$$

여기서, V_E ; 실험체에 작용하는 하중, h_e ; 실험체의 높이, V_i ; 실제 건물에서 i 층의 층전단력, h_i ; 밀면에서 i 층까지의 높이, M_E ; 실험체에 요구되는 전도모멘트, M_T ; 실제 건물에서의 전도모멘트, K ; 전도모멘트를 고려한 전단력 보정계수.

대상건물에 대한 해석결과, 벽체에 작용하는 전도모멘트는,

$$M_T = \sum_{i=1}^{15} V_i h_i = 147.25 \text{ t.m}$$

이를 식(5)에 적용할 경우, 실제 요구되는 전단력은 다음과 같다.

$$K = \frac{147.25}{(10.76)(4.5)} = 3.04$$

$$V_E = K \sum_{i=1}^{15} V_i = (3.04)(10.76t) = 32.71 t$$

전단에 대한 단면의 강도감소계수 0.85⁶⁾를 고려하면, 38.48t이 종국적으로 실험체에 요구되는 전단력이 된다.

이를 탄소성 모델로 이상화한 값(0.8Pm)과 비교하여 Fig.3에 표시하였다. 용접연결로 상.하벽을 연결한 QE3-14A 실험체와 RC 실험체는 이 값과 유사하거나 상회하는 결과를 보였으나, 조인트 박스로서 상.하벽을 연결한 QE3-14B 실험체는 요구되는 전단력의 80%정도에 해당하는 것으로 나타났다. QE3-14B 실험체의 실제 보유내력(P_m)은 38.6t으로서, 강도 요구치 보다는 높으나, 조인트 박스의 강도를 증가시켜 상하벽의 접합을 보다 강하게 할 필요가 있는 것으로 보여진다.

3. FEMA 273⁴⁾에 의한 연성의 평가

FEMA 273 보고서에는 새로운 재료 또는 시스템에 대해 실험적인 연구를 하도록 규정하고 있을 뿐 만 아니라, 실험결과로부터, 그 성능을 평가할 수 있는 기준을 제시하고 있다.

실험결과로부터 얻은 하중-변형 곡선은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 이상화하며, 이때, Fig. 5(a)와 같은 곡선은 e점에서의 변형이 g점에서

의 변형보다 2배 이상 큰 경우이며, Fig. 5(b)는 2배가 되지 않는 경우, (c)는 소성변형이 없는 경우이다.

이 결과를 이용한, 성능의 평가는 직접적인 주거를 위한 수준(Immediate Occupancy Level ; IOC), 생명 안전을 위한 수준(Life Safety Level ; LSL), 붕괴를 방지하기 위한 수준(Collapse Prevention Level ; CPL)으로 건물에 요구되는 기준을 구분하여 구한다. 이들 각 상태에 대해 주요부재는 다음과 같이 규정하고 있다.

- IOC : 중요하거나, 영구적인 것으로 보이는 변형과 피해
- LSL : 최대하중 시 변형의 0.75배
- CPL : 파괴하중 시 변형의 0.75배

이 기준에서는 항복하중에 대해서 LSL은 2배, CPL은 4배의 변형능력을 최소 성능으로 규정하고 있다. 그러나, 이때의 강도성능의 하한치는 항복시의 값이 되기 때문에, 변형경화 강성이 큰 경우, 즉 항복이후 강성의 기울기가 큰 경우에는 강도성능을 지나치게 과소평가하게 된다. 또한, 전술한 바와 같이 항복변위에 대해 객관적인 근거를 통한 평가가 요망되기 때문에 본 연구에서는 탄소성 모델에 의해 정의된 항복변위와 최대 변위를 이용하여 평가한다. Table 2는 실험결과로부터 각 단계에 대해 평가한 결과를 나타낸다.

Table 2로부터, 3개 실험체 모두 0.75δ_m이 δ_y

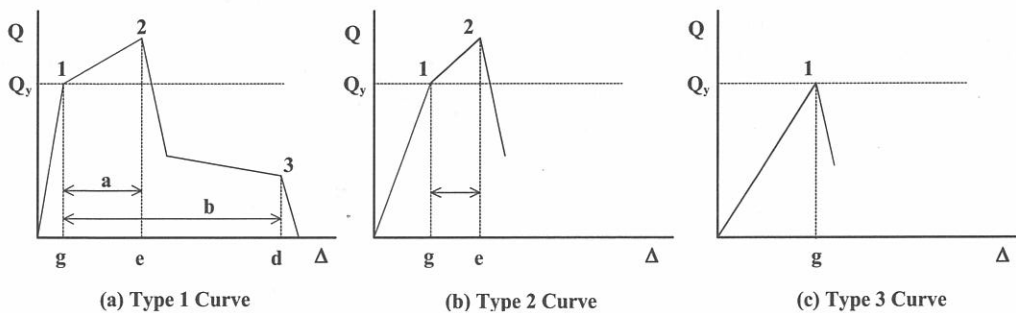


Fig. 5 FEMA 273에 정의된 이력곡선

보다 2배 이상 큰 값으로 나타나, 항복변위에 대해 생명 안전을 위한 수준의 연성은 충분히 확보하였음을 알 수 있으며, QE3-14B 실험체는 RC 실험체와 같이 파괴하중시의 변형에 대해서도 충분한 변형능력을 보유하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. FEMA 273에 의한 연성평가

실험체명	δ_y (mm)	δ_m (mm)	$0.75\delta_m$ (mm)	$\frac{0.75\delta_m}{\delta_y}$
QE3-14A	2.30	10.54	7.91	3.44
QE3-14B	1.64	13.82	10.37	6.32
QR3-14	1.46	10.8	8.10	5.55

4. 에너지 소산율의 평가

상대 에너지 소산성능이 임의 기준 값 이하일 경우, 구조물의 감쇠값은 부적절해지게 되며, 이로 인해 지진피해 이후에도 진동이 임의 시간까지 계속되어 피로효과와 초과변위가 발생하게 된다. 따라서, 임의 시스템에 대한 에너지 소산성능의 파악은 중요하다 할 수 있다.

ACI²⁾에서는 모멘트 저항 골조의 반복하중 실험에 대한 허용기준을 정하였으며, 이 기준에는 실험결과에 대한 최소한의 허용기준 뿐만 아니라, 실험방법과 보고서의 작성 등에 대한 지침도 정해져 있다. 기준에서 규정하고 있는 내용은 실험

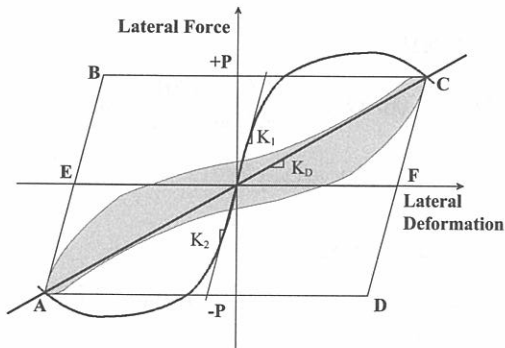


Fig. 6 에너지 소산성능

으로부터 얻은 이력곡선의 강성, 최대내력, 최대 변형능력, 최소 에너지 소산성능 등이다. Fig. 6은 에너지 소산성능을 표현한 것으로서, 해당 변위에 대한 에너지 소산성능은 실제 하중-변위 곡선상에서 나타난 부분(빗금친 부분)과 사다리꼴 부분의 면적 비로 표현된다.

그림에서 에너지 소산면적 비는 이력곡선에 의해 만들어진 에너지 면적(A_h)과 A점과 C점에서 탄성 기울기 K_2 와 K_1 으로 연장하여 만들어진 사다리꼴 부분의 면적 비로 표현된다.

각 단계별 에너지 소산율 :

$$\eta_i = \frac{A_{hi}}{E_{EPP}} \quad (6)$$

누적에너지 소산율⁹⁾ :

$$\eta_T = \frac{\sum A_{hi}}{\sum E_{EPP}} \quad (7)$$

$$E_{EPP} = (F_{ni}^+ + F_{ni}^-) \delta_i \quad (8)$$

여기서, η_i ; i 단계에서의 에너지 소산율, η_T ; 누적에너지 소산율, A_{hi} ; i 단계에서의 소산 에너지, F_{ni}^+ , F_{ni}^- ; i 단계에서의 정,부방향 최대강도, E_{EPP} ; i 단계에서의 완전탄소성 소산 면적

Fig. 6에서, A점과 C점은 기준에서 정한 한계 증변위가 되지만, 벽식 구조에 대해서 국내 실정에 적합한 한계 증변위각의 결정이 어렵기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 최대내력 이후 20% 내력이 저하된 부분으로 한다.

식 (6)과 (7)에 의해 평가된 각 실험체의 에너지 소산율을 나타내면 Table 3과 같다.

최대변위에서, PC 실험체의 에너지 소산율은 용접연결 실험체가 RC 실험체의 83%, 조인트박스연결 실험체가 96%로 나타났으며, 최대변위까지의 누적에너지 소산율은 용접연결 실험체가 RC 실험체의 95%, 조인트박스연결 실험체가

RC 실험체의 94%로 나타나, PC 실험체의 에너지 소산율은 RC 실험체에 대해서 최소 83%부터 최대 96%에 달하며, 평균 90% 정도인 것으로 나타났다.

Table 3. 에너지 소산율

실험체 명	최대변위에서의 에너지소산율			누적에너지 소산율		
	A_{hi} (mm ²)	E_{EPPi} (t.mm)	η_i (%)	ΣA_{hi} (mm ²)	ΣE_{EPPi} (t.mm)	η_r (%)
QE3-14A	647	5208	35.14	5208	9937	52.40
QE3-14B	740	7127	40.66	7127	13838	51.50
QR3-14	746	6435	42.33	6435	11722	54.90

5. 최대 내력의 산정

프리캐스트 콘크리트 대형 판 구조는 접합부의 내력에 의해 전체 내력이 지배되기 때문에 그 설계방법은 벽판의 휨 및 전단내력과 접합부에서의 내력산정이 요망된다.

본 연구에서 대상으로 한 실험체는 수직 및 수평 접합부가 조합되어 있는 구조체이기 때문에 그 내력산정은 단일식을 이용하여 구하기가 어렵

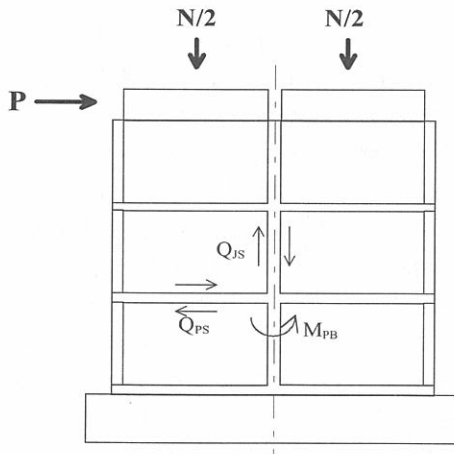


Fig. 7 최대내력시의 파괴메카니즘

다. 이러한 구조체에 대한 내력산정을 위하여 Mochizuki¹⁰⁾는 각 접합부의 최대내력을 계산한 후 이를 횡력으로 실험체의 형상비에 따라 환산하는 방법을 사용하였는데, 본 연구에서도 이 방법을 사용하여 최대 내력을 산정하였다. 각 접합부의 내력은 기존의 연구자들에 의해 제시된 접합부 내력 산정식을 사용하였다. Fig. 7은 본 연구에서 대상으로 한 실험체의 접합부에 작용하는 전단력과 모멘트를 나타낸 것이다. 실제 실험체의 최대내력은 예상되는 각 부위의 내력으로부터 산정하였으며, 이때 적용한 각 부위의 내력산정식은 다음과 같다.

1) 벽판의 휨 항복 내력에 따른 전단력

$$Q_{pb} = M_{PB}/H$$

여기서,

$$M_{PB} = [0.9a_t f_y d + 0.5ND(1 - N/bdDf_c)] \quad (9)$$

2) 벽판 및 슬래브의 전단력

벽판 :

$$Q_{ps} = R_U (0.0679 P_{wt}^{0.23} \frac{(f_c + 180)}{\sqrt{M/Qd + 0.12}} + 2.7\sqrt{P_{wh} f_{wh} + 0.1\sigma}) bjd \quad (10)$$

여기서,

$$R_U = (1 - \sqrt{h_0 l_0 / HL}) \quad (11)$$

슬래브 :

$$Q_{ss} = 0.0679 P_{st}^{0.23} \frac{(f_c + 180)}{\sqrt{M/Qd + 0.12}} bjd \quad (12)$$

3) 수직접합부의 전단력¹¹⁾

수직방향 전단력 :

$$Q_{JS} = \phi(A_k f_c \sqrt{(0.494 - 0.955\eta)\eta} 0.955) \quad \eta < 0.097$$

$$Q_{JS} = \phi(0.119A_k f_c + 0.764A_s f_y) \quad (13)$$

$$\eta \geq 0.097$$

$$\eta = A_s f_y / f_c A_k$$

단, 횡보강근의 f_y 는 2400 kg/cm^2 이하로 함.

수평방향 전단력 :

$$Q_{\max} = (Q_{JS} + Q_{SS})L/H$$

4) 수평 접합부의 전단력

$$Q_{hs} = 0.7(f_{ly} A_h + N) \quad (14)$$

여기서,

a_t : 연직방향 철근단면적, A_h : 수직보강철근의 단면적, A_k : 전단 키의 단면적, A_s : 루프철근의 단면적, D : 벽판의 길이, d : 벽판의 유효길이, b : 벽판의 두께, p_{wt} : 벽판의 인장철근비, p_{st} : 슬래브의 인장철근비, p_{wh} : 벽판의 전단보강근비, H : 벽판의 높이, L : 수직접합부를 포함하는 벽판의 길이, h_o : 개구부의 높이, l_o : 개구부의 길이, N , σ_0 : 축방향력 및 응력, f_y : 벽판철근의 항복강도, f_{wh} : 벽판 전단보강근의 항복강도, f_{sy} : 슬래브근의 항복강도, f_{ly} : 수직보강철근의 항복강도, f_c : 벽판 및 수직접합부 콘크리트의 압축강도, μ : 마찰계수.

계산결과와 실험결과를 비교하여 Table 4에 나타내었다. 계산결과와 실험결과와의 비가, QE3-14A 실험체는 1.36, QE3-14B 실험체는 1.07로 나타나, 본 연구에서 적용한 최대내력 예측방법에

의하여 대형 콘크리트 판구조의 내력예측이 가능함을 알 수 있다.

6. 결 론

1) 탄소성모델로 이상화하여 각 실험체의 연성을 평가한 결과, 용접에 의해 상하부 벽판을 강하게 연결한 PC 실험체의 경우는 높은 항복변위를 가지는 반면에 낮은 연성비($\mu=4.58$)를 보이는 것으로 나타났으나, 조인트 박스로 연결된 PC 실험체($\mu=8.43$)의 경우는 RC 실험체($\mu=7.40$)보다 다소 높은 연성비를 보유한 것으로 나타났다.

2) PC 실험체의 탄성강성은 RC 실험체의 67%, 72%로서, 평균 70%에 해당하는 것으로 나타났다. 따라서, 대형 콘크리트 판구조 건물의 변형 계산시에는 저감된 탄성계수를 사용하는 것이 바람직 할 것으로 보여진다.

3) 현행 규준에서 요구하는 강도요구치와 실험결과($0.8P_m$)를 비교한 결과, 용접연결로 상.하벽을 연결한 QE3-14A 실험체와 RC 실험체는 이 값과 유사하거나 상회하는 결과를 보였으나, 조인트 박스로서 상.하벽을 연결한 QE3-14B 실험체는 요구되는 전단력의 80%정도에 해당하는 것으로 나타났다. 그러나, QE3-14B 실험체의 실제 보유내력(P_m)은 38.6t으로서, 강도 요구치와 거의 같음을 알 수 있다.

4) FEMA 273에서 정의된 가이드 라인에 따

Table 4. 최대내력에 대한 계산결과와 실험결과와의 비교

단위 : ton

실험체 명	층수	벽 판 널		수평 접합부 Q_{hs}	수직 접합부			실험결과	실험결과 계산결과
		Q_{pb}	Q_{ps}		Q_{ss}	Q_{js}	$1_H Q_{\max}$		
QE3-14A	1	<u>36.8</u>	39.6	49.7	7.6	32.7	40.9	50.2	1.36
	2	50.4	45.1						
	3	90.0	59.7						
QE3-14B	1	42.0	43.6	55.9	7.5	29.9	<u>35.9</u>	38.6	1.07
	2	61.6	51.1						
	3	115.7	65.9						

* 수평방향의 힘으로 치환된 벽판널, 수평 접합부, 수직 접합부의 전단내력 중 가장 작은 값 (표에서 밑줄로 표시된 값)

라 실험결과와 연성을 평가한 결과, 항복변위에 대해 생명 안전을 위한 수준의 연성은 충분히 확보하는 것으로 나타났으며, 특히 조인트박스로 연결된 PC 실험체는 RC 실험체와 같이 파괴하중시의 변형에 대해서도 충분한 변형능력을 보유하고 있음을 알 수 있다.

5) 실험체의 에너지 소산율을 평가한 결과, PC 실험체의 에너지 소산율은 RC 실험체에 대해서 최소 83%부터 최대 96%에 달하며, 평균 90% 정도인 것으로 나타났다.

6) 각 접합부의 항복기로부터 최대내력을 산정한 결과 실험결과와 좋은 일치를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 이 방법에 의하여 복잡한 파괴기구를 보이는 대형 콘크리트 판구조의 내력 예측이 가능한 것으로 보여진다.

본 연구는 초대형 구조시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. ACI Committee, "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing", American Concrete Institute, Proposed Provisional Standard, 1996.

3. 서수연, "대형 콘크리트 판구조의 이력거동에 관한 연구", 한양대학교 박사학위 논문, 1995. 2
4. Federal Emergency Agency, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA-273 Report, October 1997.
5. R. Park, "Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Test", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, September 1989, pp.155-166.
6. 건설부, "프리캐스트 콘크리트 조립식 건축 구조설계기준 및 해설", 1992.
7. 건설부, "내진설계 지침서 작성에 관한 연구", 1987.
8. Building Seismic Safety Council, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures", National Earthquake Hazard Reduction Program, Washington, D.C., 1997
9. 김장훈, 이리형, "R.C. 구조물의 지진에너지 흡수 능력 연구", 한국지진공학회 추계학술대회논문, 1997. pp.217-224.
10. 日本建築學會, "壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の舉動と設計法", 1989
11. 서수연, 이원호, 이리형, "대형 콘크리트 패널구조의 수직접합부 전단강도에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 6, No. 1, 1994.2, pp.11-119.