

1/3 축척 모형실험에 의한 프리캐스트 콘크리트 판구조의 상사성에 관한 연구

A Study on the Similitude of Precast Concrete Panel Structure Using one-third Scale Subassemblage Model

윤 재 진*
Youn, Jae Jin

요 약

본 연구는 실물크기의 프리캐스트 콘크리트 판구조물의 부분구조체를 모형화하여 실험한 결과를 분석한 것이다. 구조물의 역학적 특성과 파괴성상을 파악하기 위한 구조실험은 실물크기의 구조물과 부재로써 실시하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 이것은 치수가 크므로 공간적으로 제한을 받고 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에 모형실험을 이용하게 된다. 이러한 모형실험을 최소한의 오차범위내에서 원형실험과 같은 결과를 재현하고 예측하도록 실험을 준비하는 데에는 상사법칙이 필요하게 된다. 모형은 무엇보다도 원형과의 응력-변형도 관계 등 구성재료에 대한 상사요구조건을 만족시키는 것이 중요하지만, 본 연구의 대상은 1/3축척으로써 실험체의 기하학적인 요소와 사용재료에 대한 강도의 상사성만을 고려한 모형이다. 본 연구에서는 이러한 모형구조물의 거동을 원형실험결과와 비교하여 상사성 확보의 문제와 가능성을 조사하였다.

Abstract

This paper presents the results of test conducted on 1/3 scale precast concrete model. A model can be built and tested at a small fraction of the cost of a prototype(full scale) because of the reductions in loading magnitudes and in construction costs. However, model must be designed, loaded, and interpreted to comply with the similitude requirements for a reduced scale model of prototype. In order to achieve similitude with prototype, it is necessary to satisfy similitude with regard to geometric and loading parameters and material properties. The geometric and material properties(ultimate compressive or tensile strength) of the prototype as well as the loading history are simulated, as closely as possible, in the 1/3 scale model experiment.

Conclusions are drawn on the possibilities and limitations of model testing of precast concrete panel structures which are subjected to reversed cyclic loading history.

Keywords : loading history, prototype(full scale), precast concrete panel structure, similitude, similitude requirements, subassemblage model, 1/3 scale model.

* 정회원, 숭실대 건축공학과 강사, 공학박사

1. 서 론

구조물의 역학적 특성과 파괴성상을 파악하기 위한 구조실험은 실험크기(이하 원형이라 한다)의 구조물과 부재로써 실시하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 이것은 치수가 크므로 공간적으로 제한을 받고 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에 모형실험을 이용하게 된다. 이러한 모형실험을 최소한의 오차범위내에서 원형실험과 같은 결과를 재현하고 예측하도록 실험을 준비하는데에는 상사법칙이 필요하게 된다. 즉, 원형구조체를 모형화시키기 위하여는 원형의 모든 조건이 모형의 그것과 상사성이 성립되어야 한다. 그러나, 모형실험에서 측정된 결과를 가지고 실물에 생기는 현상을 얼마나 정확하게 추정할 수 있는지의 문제는 상당히 어려움이 따른다. 이러한 관점에서 축척효과(Scale Effects)를 포함한 여러 조건들을 최소화하게 된다. 모형실험체는 무엇보다도 원형과의 응력-변형도 관계등 구성재료에 대한 상사요구조건을 만족시키는 것이 중요하지만, 본 연구의 대상 실험체는 1/3 축척으로써 기하학적인 요소와 사용재료에 대한 강도의 상사성만을 고려한 모형이다. 본 연구에서는 이러한 모형구조물의 거동을 원형과 비교하여 상사성 확보의 분제와 가능성을 조사하는데 목표를 두었다.

2. 상사법칙(Similitude Law)

상사법칙은 구조거동을 포함한 물리적 현상을 차원해석으로 유도하는 것에 바탕을 두고 있다. 즉, 실험하는 사람이 어떤 물리현상을 규명하는데 있어서 변수를 구체화하여 미지수를 줄여줌으로써 실험을 간단하고 쉽게 할 수 있게 한다. 이러한 차원해석방법은 여러가지가 있으나 그 중에 Buckingham Pi 정리가 주로 사용된다[5]. 이는 개개의 변수들을 적절히 조합하여 무차원(nondimensional analysis)의 향으로 조합하는 것이다. 이와같은 무차원의 향을 π 향이라고 한다. 예를 들면, 단위길이당 등분포하중 q 를 받는 연속(스팬)보 단면의 거동을 실험에 의해 규명하려고 할 경우에 이와 관련된 물리적 매개변수로서는 변위, 탄성계수, 길이, 시간, 하중, 밀도, 중력가속

도등을 생각할 수 있다. 이들을 각각 함수 관계로써 나타내면;

$$F(u, E, \ell, t, q, \rho, g) = 0 \quad (2.1)$$

여기에서, 변위 u 를 다른 변수로써 나타내면 $u = F'(E, \ell, t, q, \rho, g)$ 이 되며 이를 연속적(continued product)의 형식으로 하면 식(2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = KE^a \ell^b t^c q^d \rho^e g^f \quad (2.2)$$

윗식을 차원식으로 취하면;

$$L \approx (FL^{-2})^a L^b T^c (FL^{-3})^d (LT^{-2})^e (LT^{-2})^f \quad (2.3)$$

식(2.3)에서 각변의 차수를 같게 놓으면 거듭제곱의 밑(fundamental measures)인 힘, 길이, 시간에 대한 3개의 등식 F 에 대해서; $0 = a + d + e$, L 에 대해서; $1 = -2a + b - d - 3e + f$, T 에 대해서; $0 = c - 2f$ 가 성립한다. 이들 3개의 등식은 6개의 미지수와 무한대의 해를 갖는다.

여기에서, a, b, c 는 d, e, f 의 향에 의하여 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} c &= 2f \\ a &= -d - e \\ b &= -d + e - f + 1 \end{aligned}$$

따라서, 식(2.2)의 변위 $u = KE^{(-d-e)} \ell^{(-d+e-f+1)} t^{2f} q^d \rho^e g^f$ 로 되며 또한 식(2.4)와 같이 표시할 수 있다.

$$\left(\frac{u}{\ell}\right) = K \left[\left(\frac{q}{E\ell}\right)^d \left(\frac{\rho\ell}{E}\right)^e \left(\frac{t^2g}{\ell}\right)^f \right] \quad (2.4)$$

식(2.4)는 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$G\left(\frac{u}{\ell}, \frac{q}{E\ell}, \frac{\rho\ell}{E}, \frac{t^2g}{\ell}\right) = 0 \quad (2.5)$$

여기에서 만일 질량 M 을 비중 ρ 대신에 적용한다면 중력가속도 g 는 대체되어 다음과 같이 될 것이다.

$$G(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (2.6)$$

여기에서 $\pi_1 = \frac{u}{\ell}$, $\pi_2 = \frac{q}{E\ell}$, $\pi_3 = \frac{M\ell^2}{Et^2}$ 이다. 또한,

$$\left(\frac{u}{\ell}\right)_m = \phi\left(\frac{q}{E\ell}, \frac{M\ell^2}{Et^2}\right) \quad (2.7)$$

상사법칙은 위 예제에서와 같은 무차원 π_1 항의 모형과 원형의 값이 같아야 성립하게 된다. 이를 테면, $(\pi_1)_{\text{model}} = (\pi_1)_{\text{prototype}}$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{u}{\ell}\right)_m &= \left(\frac{u}{\ell}\right)_p, \left(\frac{q}{E\ell}\right)_m = \left(\frac{q}{E\ell}\right)_p, \left(\frac{M\ell^2}{Et^2}\right)_m \\ &= \left(\frac{M\ell^2}{Et^2}\right)_p \text{이 성립되어야 한다.} \end{aligned}$$

즉, 원형과 모형의 값이 같아져야 그 모형실험에 의미가 있게 된다. 원형의 어떤 기본량에 대한 모형의 그 량(量)의 비를 축척계수(scale factor)라고 하는데, 본 연구대상 실험체와 같이 원형의 길이와 모형의 길이의 비가 3이면 축척계수 $S_\ell = \ell_p/\ell_m = 3$ 이라고 한다. 이 경우에 작용하중으로 인한 처짐(S_u)의 축척계수를 상정한다면 위에서 처짐변위 u 가 들어있는 π_1 항은 π_1 이다. 이 π_1 은 상사법칙에 의해

$$\left(\frac{u}{\ell}\right)_m = \left(\frac{u}{\ell}\right)_p \text{이어야 함으로, 이 식을 정리하면}$$

$\ell_p/\ell_m = u_p/u_m$ 즉, $S_u = S_u$ 가 되어 길이의 축척계수가 처짐의 축척계수와 동일하게 되었다. 또한 연구대상 실험체는 모형콘크리트로써 재료의 상사성(강도)을 고려한 마이크로 콘크리트를 사용하였기 때문에 모형재료의 탄성계수는 원형과 거의 같다고 볼 수 있으므로 $S_E = E_p/E_m = 1$ 이 된다. 이들은 모두 형상 및 치수, 재료의 특성에 따라서 변화함으로 축척계수는 정확하게는 왜곡량과 함께 표현되어 상사성 분석시에 보정치로서 적용되어야 한다. 이상과 같은 방법으로 각 변수에 대한 축척계수를 구한다.

3. 실험

3.1 일반사항

모형화에 있어서 어려운 단계중의 하나가 모형콘크리트의 선정이다. 기하학적으로는 원형과 동일한 형상이지만 재료의 성질을 상사시키는 것이 쉽지 않기 때문이다. 콘크리트의 경우는 모형콘크리트로써 마이크로 콘크리트(micro-con-

crete)를 여러가지 경우(Case)로 배합하여 강도의 상사성만으로 설정하였고, 철근의 경우에는 축척계수를 적용하여 본래철근(이하 원형철근이라 한다)과의 강도를 비교하여 상사성 확보를 도모하였다. 여기에서 마이크로 콘크리트라 함은 모형실험에 쓰인 콘크리트로서 굵은골재 최대치수가 8-3mm 정도로서 모르터에 상당하는 콘크리트를 말한다. 이 경우에는 굵은 골재의 최대치수가 작아짐으로 역학적인 성질도 상당히 변화하는 것으로 알려져 있다. 즉, 압축강도와 인장강도 혹은 탄성계수의 관계가 일반 콘크리트와 다르기 때문에 실험의 목표에 따라 그 관계를 조정할 필요가 있다. 이를테면, 압축력과 휨모멘트에 대한 거동 및 파괴성상을 위한 실험에서는 압축강도와 인장강도 혹은 양자의 비를 일치시키고, 전단과 비틀림이 관련된 경우에는 포아송비와 탄성계수도 일치시킬 필요가 있다. 그러나, 콘크리트와 같은 비균질 재료의 복잡한 영향요소의 성질을 상사시키는 것이 쉽지 않았기 때문에 본 실험에서는 실험적으로 쉽게, 원형콘크리트의 성질을 복제하기 위하여 시멘트와 골재의 혼합비를 변화시켜서 압축강도가 가장 부합되는 배합의 것을 모형콘크리트로 선정하였다.

3.2 사용재료의 선정

3.2.1 모형(마이크로) 콘크리트

가. 콘크리트 배합

원형 콘크리트에는 골재의 최대치수 25mm인 일반골재를 사용하였으나, 모형실험체의 콘크리트 상사성 확보를 위하여 모형 콘크리트 배합에 사용한 골재는 굵은골재의 경우 #4체를 통과하고 #8체에 잔류하는 것이고, 잔골재는 #8체를 통과한 것이다. 즉, 8번체를 통과한 모래를 모형모래(model sand)라고 하여 S_m 으로 표시하였고 4번체를 통과하고 8번체에 남은 크기의 모래를 모형사갈(model gravel)이라고 하여 G_m 으로 표시하였다. 이 S_m 과 G_m 의 배합비를 조정하고, 단위 수량의 증가와 혼화제 사용을 요소로 하여 Table 1과 같이 배치하였다. 접합용 모형그라우트 모르터는 #16체를 통과한 모래를 사용하였다. 이러한 배치방법은 참고문헌[3]을 참조하였다.

Table 1 Mix ratios of model concrete

Mix	W/C	Cement	Sand (S _m +G _m)	Coarse Aggregate	Remarks
Prototype	0.52(174kg/m ³)	1(337kg/m ³)	2.3(779kg/m ³)	3.1(1049kg/m ³)	
Model Case 1	0.58	1	5.4(2.3+3.1)	0	
Model Case 2	0.58	1	5.4(2.7+2.7)	0	
Model Case 3	0.58	1	5.4(1.8+3.6)	0	Admixture: 0.5% of Cement Weight

Note ① S_m: Model sand defined by particle size smaller than #8 seive

G_m: Model Gravel defined by particle size larger than #8 seive and smaller than #4 seive

나. 모형 콘크리트의 선정

축정기기의 미비로 원형과 모형 콘크리트의 응력-변형도 곡선을 획득하지 못하여 Table 2 와 같이 압축강도 및 인장강도만의 상사관계로써, 원형 콘크리트 배합강도 F_c=210kg/cm²에 가장 근접한 것으로 사료되는 배합 Case 3을 모형 콘크리트 배합비로 선정하였다.

Table 2 Summary of model concrete test results

Mix	Compressive Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Remarks
Model Case 1	387.2±19.8	32.4 ±4.5	Prototype Concrete
Model Case 2	275.1±33.9	22.58±2.1	• f _t '=251.3±17kg/cm ² • f _c '=28.2±3.2kg/cm ²
Model Case 3	217.1±11.0	26.5 ⁹ ±2.0	

Note: 1. For prototype concrete, φ15cm×30cm cylinder were tested.

2. For all model concrete, φ5cm×10cm cylinder were tested.

다. 역학적 성질

시험 배합에서 모형 콘크리트로 선정된 배합 Case 3에 의하여 제작된 모형부재와 접합용 모형 그라우트 모르타의 강도는 Table 3과 같다.

Table 3 Characteristics of subassemblage model concrete

구분	Compressive Strength (kg/cm ²)		Tensile Strength (kg/cm ²)	
	21 Day	28 Day	21 Day	28 Day
Concrete Panel	138±17.4	186±19.1	30.1±0.7	31.5±1.4
Grout Concrete	-	132.5	-	-

φ5cm×10cm Cylinder

3.2.2 모형철근

원형 실험체에서 사용한 철근을 소정의 축척으로 축소화(scale down)하였을 때 1/3축척에 정확히 맞는 해당철근을 구하기가 곤란하여 요구되는 직경에 가장 가깝다고 판단되는 제품으로 규격을 조정하였고, 이형철근은 보통철선 혹은 소철선을 특수하게 제작된 압연장치로 냉간압연하여 제작하였다. 여기에서 휘어진 압연철선은 고무망치로

Table 4 Similitude of prototype and model reinforcement

Rebar Type	Model Reinforcement			Test Results		Prototype Reinforcement Prototype Strength/9 Scale Factor=S _E S _f ² =1×3 ² =9
	Nominal Size	Measured Diameter(mm)	Yield Strength (kg/cm ²)	Yield Strength * (kg)		
Round Wire	#10	3. ²⁵	2259	187.5	1) φ 9:3232×0.77(Area)×1/9=276.5kg 2) φ 12:3642×1.16×1/9=469.4kg 3) φ 16:3623×2.01×1/9=809kg 4) D10:3873×0.71×1/9=305.5kg 5) D13:3950×1.27×1/9=557kg 6) D16:4160×1.99×1/9=902kg	
	#8	4. ²	1588	220		
	#6	5. ⁶	1337	1) ¹⁾ 262.5		
	#12	2. ⁶⁵	5616	1) ¹⁾ 310		
Cold-Drawn Steel Wire	#10	3. ²	5939	2) ²⁾ 477.5		
	#8	4. ⁰	6414	3) ³⁾ 806.2		
	#6	4. ⁶⁵	5468	1010		
Welded Deformed Steel Wire	#8	4. ²	6498	6) ⁶⁾ 900	*1), 2), 3), 4), 5), 6) indicate similitude relations between prototype and model reinforcement	
Deformed Bar	#4	6. ³	3392	1057.5		
	D6	6. ²⁵	3911	1200		

바로 잡아 가공한 다음 인장시험을 실시하여 Table 4와 같이 모형철근으로서의 타당성을 조사한 결과를 토대로, 해당되는 모형철근을 선정하였다.

3.3 실험방법

본 구조모형실험은 구조의 거동분석과 함께 원형실험체와의 상사성을 파악하는 것이므로, 원형재료의 역학적 성질을 고려하고 Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 기하학적으로 동일한 형상으로 재현하였다. 즉, 원형실험과 동일한 방법으로 2층 벽보를 구속 보강(confine)하여 선파괴(先破壞)를 방지한 상태에서, Fig. 3과 같이 2층 벽체 상부면에 재하장치(loading device)를 연결하여 최대 가동거리(Stroke) $\pm 15\text{cm}$ 의 5t Actuator를 설치하였고, LVDT와 스트레인 게이지로써 수평접합부의 미끄러짐(slip) 및 벌어짐(opening), 수직접합부의 미끄러짐, 벽판의 전단변형, 수평접합철근(hair pin 형태) 및 수직보강철근(vertical tie)의 변형도, 전체 구조물의 횡면위동을 측정하였다. 가력방식은 변위제이(displacement control) 방식으로써 Fig. 4와 같이 +, -2방향(cyclic) 단순증가에 의하였다. 여기에서 적용한 변위폭은 원형실험의 기준항복변위 $\delta_y = 4\text{mm}$ 에 축적계수

3를 적용한 $4/3\text{mm}$ 로써 변위이력을 제어하였다. 즉, 제1단계는 $0.5\delta_y$, 제2단계부터는 $1\delta_y$ 의 증가로 7단계까지 제어하다가 8단계에서 10단계까지는 $2\delta_y$ 의 증가폭으로 제어하고 마지막 11단계에서는 증가폭을 $3\delta_y$ 로 하는 변위이력으로 가력하였다. 원형과 마찬가지로 각 변위 단계별로 3사이클을 적용하고 1사이클당 실험 데이터 습득 60점을 얻기 위하여 변위속도를 사이클당 3분으로 하였다. 실험 데이터 습득속도는 실험진행 상황을 고려하여 3초로 하였는데, 이는 한 사이클당 60데이터 포인트의 습득이 가능하다. 결국, 실제의 변위속도는 초기에는 느리게 되며 변위단계의 수준이 높아지면 빠르게 작용하는 것이 된다.

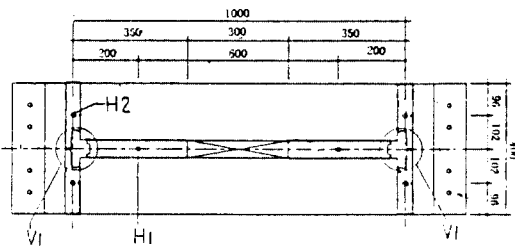


Fig. 1 1/3 Scale plane of subassemblage

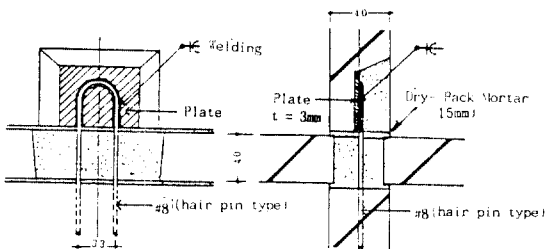


Fig. 2 1/3 Scale model horizontal joint(H1)

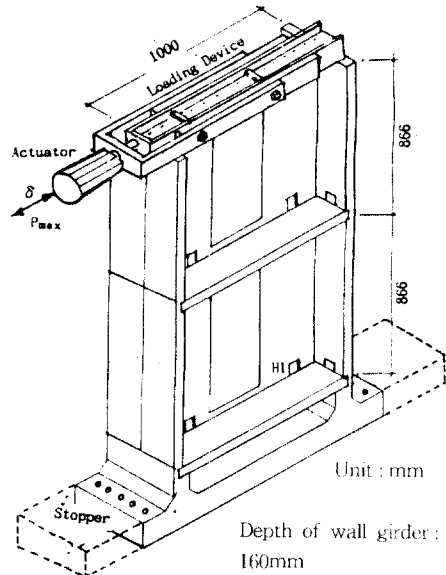


Fig. 3 View of test set-up

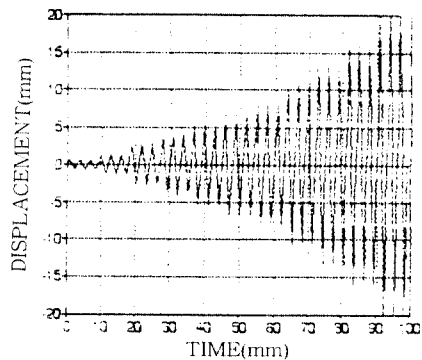


Fig. 4 Loading history

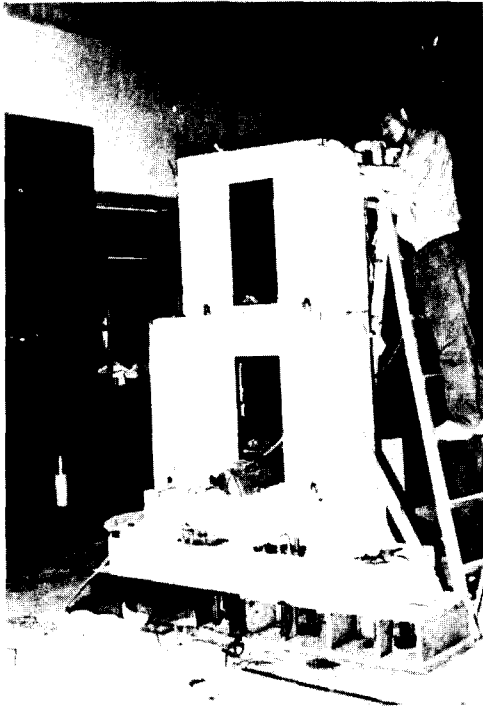


Photo. 1 Subassemblage model

4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴상황

균열은 1층 개구부 벽보 모서리에서 먼저 발생하고서 1층 수평 접합부에서 일어났다. 균열은 대체적으로 벽보에서는 급경사형으로, 양쪽 벽주의 측부에서는 수평 방향으로 일어났고 접합부는 접합그라우트 콘크리트와 벽판이 맞닿은 면에 연하여서 발생하였다. 결국, 실험체의 최종파괴는 가력 Actuator 쪽 날개벽의 큰 받이짐과 함께 수평 접합부철근(H1)의 절단으로 일어났다.

4.2 구조체의 하중-변위관계

2층 벽보의 상단중앙점에 대한 측정결과인 Fig. 5 b) 및 Fig. 6의 하중-변위곡선은 하중과 변위에 각각의 축척계수를 적용하여 모형실험결과를 원형화(정규화, normalize)시킨 결과이다. 이 과정은 하중(y축)에 대하여는 하중의 축척계수(force

scale factor) S_F , S_l^2 를 변위(x축)에 대해서는 변위 축척계수(displacement scale factor) S_u 를 곱하여 구한 값이다.

즉,

$$S_F S_l^2 = 9, \quad S_u = 3$$

여기에서

S_F = 재료의 탄성계수 축척계수, 1.0

S_l = 실험체의 길이 축척계수(= S_u), l_p/l_m

l_p = 원형실험체의 치수

l_m = 모형실험체의 치수

Fig. 6의 곡선을 보면 원형은 1단계에서 각 사이클의 하중-변위가 거의 선형을 유지하고 있으나, 모형은 하중 재하시(reloading)에 약간의 산유변형(영구소성 변위)이 발생하였고, 제어변위 $\delta = 4/3\text{mm}$ 의 2단계에서는 약간의 강성감쇄 현상이 일어나기 시작하여 3단계 이후에는 비탄성 이동과 함께 저항성(강성)이 점점 떨어지고 있다. 양(+)의 방향에서는 8단계에서 변위 30.4mm로써 최대하중 15.75ton(원형의 경우 9단계, 22.45ton)를, 음(-)의 방향에서는 10단계에서 변위 48mm로써 17.26ton(원형의 경우 8단계, 22.45ton)를 나타냈다. 또한, 변위제어폭이 커지면서 편칭 현상을 나타냈는데 초기 3단계에서 부터 일어나기 시작했다. 이 현상은 원형과 마찬가지로 1층 수평 접합부의 미끄러짐 및 벌어짐이 주된 요인이 되었다. 특히 양의 방향의 경우 초기단계에서는 원형 시험체와 마찬가지로 변위의 증가와 함께 강도가 증가하는 현상을 보이나 후기 사이클에서는 완전히 누워버리는 편칭 현상이 더욱 현저하게 나타났다. 이는 양의 방향 사이클에서 수평접합부의 용접철근(#8, 4.85mm 보통철선)의 심한 소성변형에 의한 것이다.

4.2.1 단계별 강도의 변위

1단계의 최대하중은 음의 방향 3.90t(변위 0.57mm), 양의 방향 4.95t(변위 1.16mm)으로 나타났고, 2단계에서는 양의 방향 8.03t, 음의 방향 6.51t에 달하여 양의 방향이 음의 방향보다 강도가 다소 크게 나타났다. 계속해서 양의 방향이 다소 높게 진행되다가 8단계에서 부터 저하하기

시작하였다. 그러나 음의 방향 사이클의 경우에는 여전히 변위가 증가함에도 하중이 마지막 단계까지도 거의 하락하지 않았다. 이는 수평접합부철근의 용접에 의한 단면 결손의 정도에 의한 차이로써, 반대쪽의 철근이 상대적으로 용접에 의한 결손이 적어서 소정의 내력을 발휘하고 있는 현상으로 판단된다.

원형과의 비교를 위해 제어변위 20mm(scale factor 적용시 60mm)에서 실험을 종료하였으나 음의 방향 사이클의 변형능력은 더욱 유지되었을 것으로 추측된다.

4.2.2 강성의 변화

Fig. 6 a)에서와 같이 1단계에서는 각 사이클간의 강성저하는 무시할 정도이나 약간의 소성변형이 발생하였다. 2단계에서부터는 단계 및 사이클간의 강성 저하 현상이 뚜렷이 나타났고 양의 방향이 음의 방향에 비해 최대강도로의 상승이 더욱 크게 진행되고 있다. 이 현상은 앞에서 언급한 바 있는 양쪽 수평접합부철근의 변형능력의 불균형현상이 초기 단계에서부터 일어나고 있음을 의미한다. 3단계의 음의 방향 첫사이클의 강성(1.029t/mm)은 2단계(1.431t/mm)에 비하여 약간 떨어지는 정도이고 양의 방향의 경우에는 6.3ton까지는 선형을 유지하다가 다소 저하하였다. 이 단계 이후부터는 서서히 핀칭 현상이 진행되었다. 여기에서, 강성은 Fig. 9와 같이 영변위(zero displacement)와 최대강도를 이은 기울기를 의미하는데, 이와같은 강성계산은 후반 사이클에서 발생한 핀칭부분에 대해서는 강성이 높게 산정된다.

4.2.3 에너지 소산 능력

Fig. 6의 각 단계별 하중-변위 사이클로 둘러싸인 면적에 대한 루프의 형태를 보면 크게 비대하지 않음을 알 수 있다. 이는 에너지 소산능력이 다소 낮다는 것을 나타낸다. 그러나, 이것은 프리캐스트 콘크리트 판구조의 특성을 나타낸 것이 아니라 축하중(자중)이 작고 철근비가 낮은 것에 기인한 현상으로 볼 수 있다. 일반적으로 수평저항은 축하중 없이 철근으로 휨저항을 하거나, 축하중에 대한 안정효과(마찰작용 등)로써 저항하

게 되는데, 주어진 변위 진폭에서의 에너지소산은 주로 철근에 의하여 저항의 주된 부분이 수직하중이면 이력루프는 좁아진다. 즉, 다시말해서 동일하게 보강되고 축하중을 받는 일체식 구조체이면 더욱더 비대하지 않게 되며, 철근이 더 배근됨으로서 다소 더 비대하여 진다[4].

4.3 접합부의 하중-변위관계

4.3.1 수평 접합부의 하중-변위

미끄러짐기동의 경우 1층 하부접합면은 최종 11단계에서도 미끄러짐이 미소(=0.09mm)하지만, 상부접합면은 최대 하중에서 2.1mm, 파괴시에 10.1mm를 나타냈다. 이러한 거동은 접합면의 상태에 의한 영향으로도 생각할 수 있으나 이 경우에는 상부접합면부분의 접합철근의 결손이 주된 요인이 된 것으로 보인다. 또한, 음의 방향사이클에서 초기에는 거의 변위만 증가하다가 나중에는 미끄러짐의 증가율이 줄어들면서 하중도 증가하여 최대하중이 저하하지 않는 현상을 나타냈는데 이는 수평접합부철근이 장부작용과 함께 인장저항을 한 것으로 볼 수 있다. 반면에, 2층 상부 접합면이 하부 접합면에 비하여 매우 작게 나타난 현상은 깔모르터의 충전 밀실도에 의한 차이로 판단된다.

벌어짐기동은 원형과 같은 양상으로써 2층보다 1층에서 크게 나타났으나, 1/3 축척 모형실험임에도 불구하고 원형과 비슷한 량의 벌어짐이 발생하였다. 원형과 모형재료의 성질의 차이로 인한 철근의 소성변형, 콘크리트 파괴등의 요인이 있었다고 할지라도, 한편으로 이러한 기동은 전체의 변형성분이 이 부분의 벌어짐에 의해 영향을 받을 수 있으며, 다른 한편으로는 수평접합부가 인장에 취약하다는 의미이다. 벌어짐은 원형에 비하여 3.2배정도 크게 나타났지만, 반복하중에 의해서 접합면이 열리고 닫히는 거동을 나타내는 이력의 형태는 Fig. 7과 같이 대체적으로 원형과 모형이 서로 유사하였다.

4.3.2 수직 접합부의 하중-변위

1층 수직접합부에서 미끄러짐이 다소 크게 거동을 하였으나, 반복하중에 의해서 압축과 인장을

받아 고대로 미끄러지는 이력거동이 현저하게 나타나지 않았다. 이는 양쪽(실험체에서 왼쪽 오른쪽을 의미) 접합부의 성능이 같지 않음을 의미한다.

2층 접합부의 미끄러짐거동은 미소하며 전하중 단계에 있어서 탄성적으로 거동하였다. 이는 실험체가 캔틸레버에 준하는 거동을 하여 2층접합부가 1층보다 다소 작은 모멘트를 받음으로써 일어난 거동으로 사료된다.

4.3.3 수직보강철근 및 수평접합부철근의 변형도
1층 한쪽의 수직 보강철근의 최대변형도는 1

$.4 \times 10^3$ micro epsilon으로써 그 반대쪽(8×10^3 micro epsilon)보다 먼저 항복점에 도달하여 이 시점에서 반복하중에 의해 이미 부착력을 상실한 정도에 이르렀으나 반대쪽은 그 변형능력을 계속 발휘하였다. 수평접합부철근은 후기의 변위단계에서 부터 1층 수직보강철근보다 변형도가 더욱 증가하였는데 이는 응력이 수평접합부철근으로 점차적으로 전이되고 있음을 의미한다. 즉, 수평접합부의 벌어짐 증가와 함께 응력의 중립축이 이동함에 따라서 내부의 접합철근의 쪽으로 힘이 전달 되는 변화를 보였다.

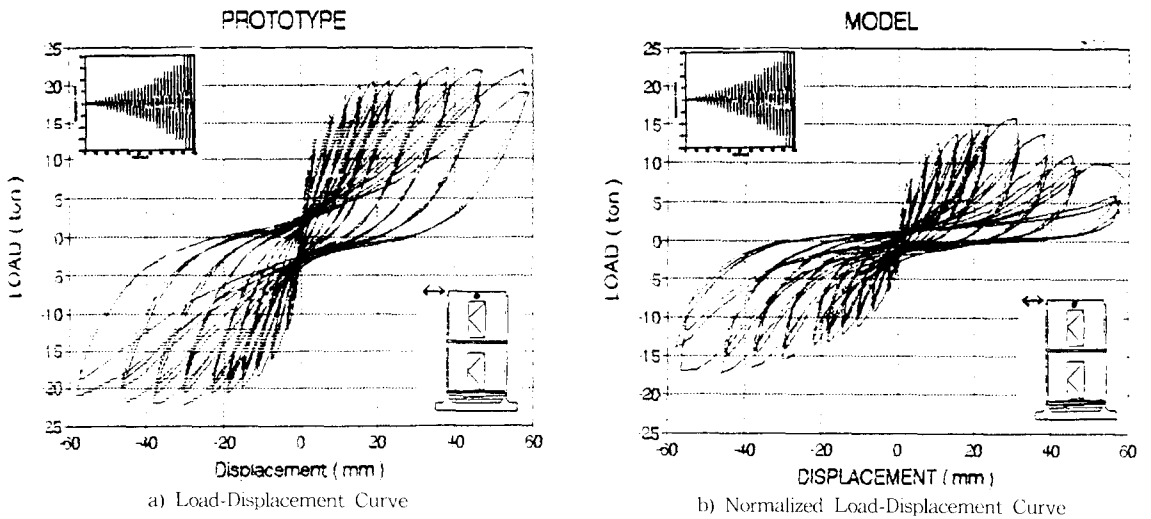
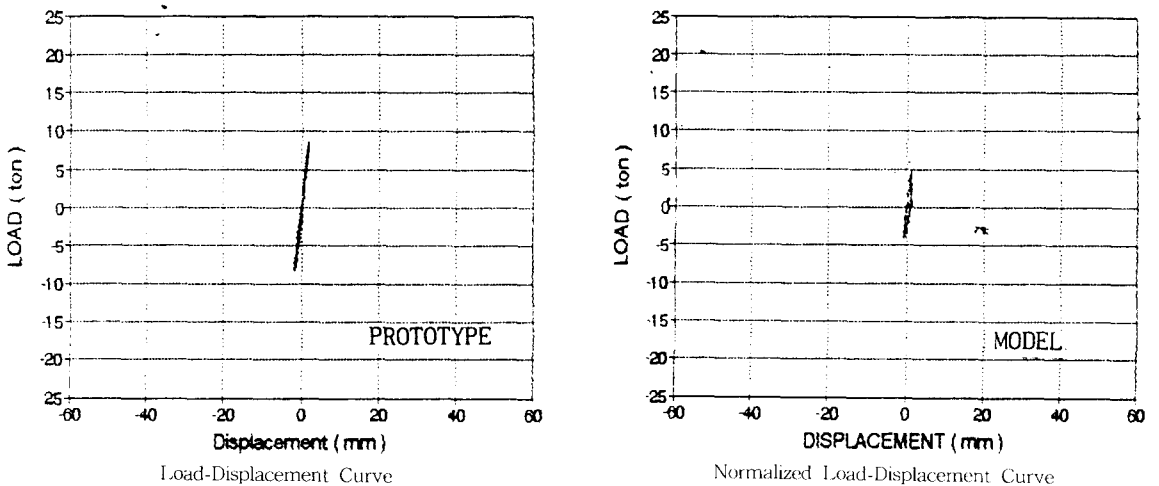
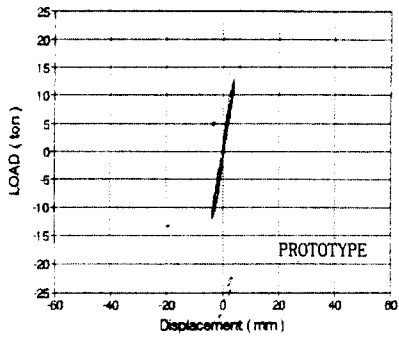


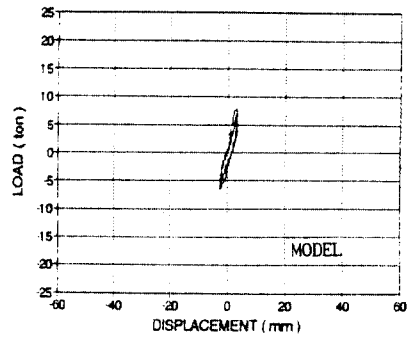
Fig. 5 Comparison of the load-top displacement curve



a) 1 Stage(0.5δ,)

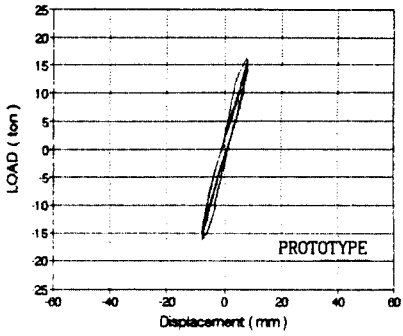


Load-Displacement Curve

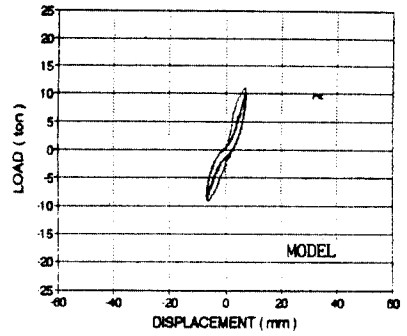


Normalized Load-Displacement Curve

b) 2 Stage(1.0 δ_y)

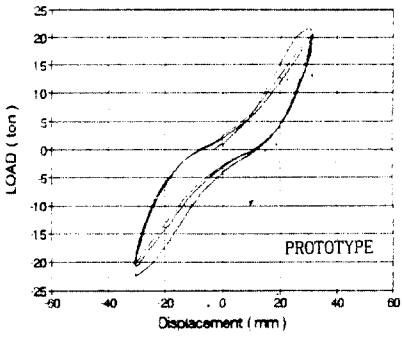


Load-Displacement Curve

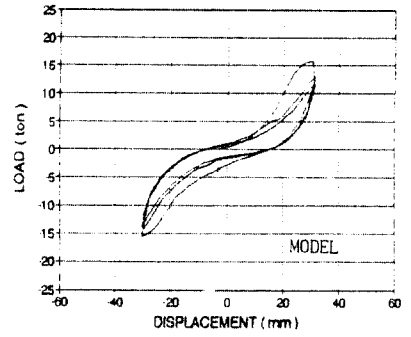


Normalized Load-Displacement Curve

c) 3 Stage(2.0 δ_y)

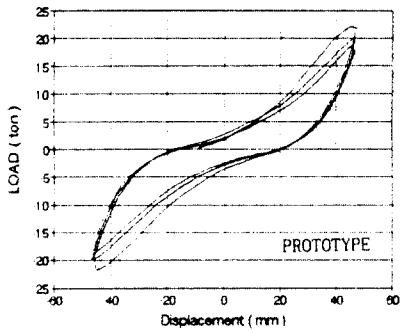


Load-Displacement Curve

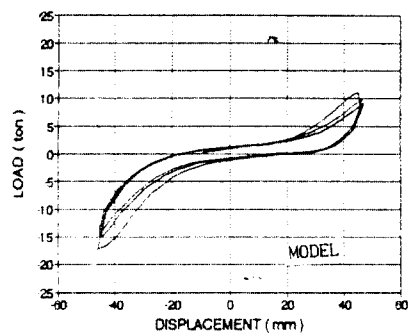


Normalized Load-Displacement Curve

d) 8 Stage(8.0 δ_y)



Load-Displacement Curve



Normalized Load-Displacement Curve

e) 10 Stage(12.0 δ_y)

Fig. 6 Load-top displacement hysteresis loops for each stage

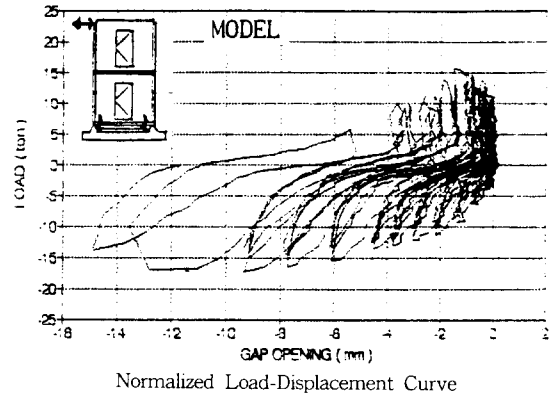
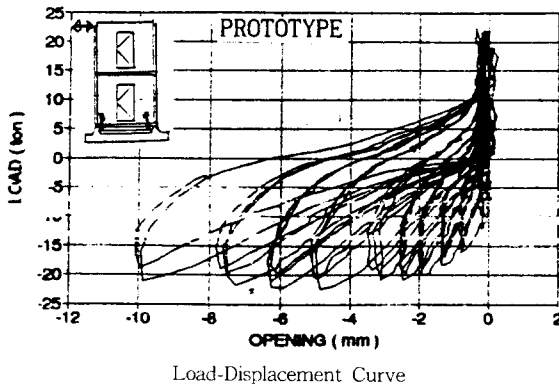


Fig. 7 Load-slip curve for 1 floor level

5. 원형 실험체와의 상사성 비교

5.1 균열 및 파괴상황

작용하중에 민감한 거동을 보인 부분이 수평 접합부와 날개벽부분의 수평접합부, 벽보의 모서리로 나타나 이 부분이 구조적으로 취약하다는 관점에서는 유사하다. 그러나, 수평접합부 철근의 단면 결손에 따른 수평 접합부의 조기 파괴로 인하여 벽보에서의 콘크리트 탈락등이 발생하지 않았기 때문에 균열의 양상등을 직접 원형과 비교하기는 곤란하였다.

5.2 구조체 전체 하중-변위관계

Fig. 5 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 하중과 변위성분에 Scale Factor S_E , S_L^2 , S_u 를 각각 곱하여 정규화한 하중-변위곡선이 외관상으로 원형과는 다소 다르다. 이들의 정규화곡선은 실험 및 상사성의 왜곡(distortion)에 대한 편차가 보정되지 아니한 것이다. 더구나, 프리캐스트 콘크리트 판구조는 접합부분의 불연속성으로 인하여 이 부분에서 변형과 응력집중이 생겨 민감하게 거동을 함으로 작은 편차가 거동에 큰 영향을 줄 수 있다. 이러한 점들을 감안할 경우 강도, 강성, 벌어짐등이 원형과 유사하게 거동하였음을 인지할 수 있다. 특히 수평접합부 철근의 용접에 의한 단면결손이 상대적으로 적은 것으로 간주되는 음의 방향 하중-변위곡선은 매우 유사함을 나타냈다. 구조물의

층간변위성분의 분포에 의하면 실험체가 캔틸레버 보에 준하는 거동을 한 것으로 판단되며 벽판의 전단변형은 무시될 정도로 극히 미소하게 나타났다.

가. 강도 및 강성

음의 방향 첫사이클의 단계별강도는 원형과 평균 35%의 차이를 보였으나 강도의 변화는 Fig. 8에 나타난 바와같이 유사하다. 원형실험체 무게의 1/27에 상당한 모형실험체의 하중감소에 의한 마찰저항의 감소 및 낮은 철근강도(Table 4), 실험 오차등을 감안한다면 좋은 상사관계를 유지한 것으로 볼 수 있다.

강성은 Fig. 9에서와 같이 단계별(음의 방향)로 유사한 강성변화를 나타냈고 첫단계와 10단계에서는 다소 크거나 같다.

나. 에너지 소산능력

Fig. 6에서 보는바와 같이 같은 변위단계에서는 이력루프로 둘러쌓인 면적부분의 원형과 모형의 형태가 크게 비대하지 않음에 비추어 모두 소산능력이 낮은 것으로 평가되며, Fig. 10의 에너지소산량의 변화를 보면 사이클이 증가할수록 원형이 더욱 소산속도가 빨라지고 있다. 전체에너지 소산량은 원형이 $8504t \cdot mm$ 로써 $3982t \cdot mm$ 인 모형의 2.02배이며 Darwin과 Nmai[2]가 제안한 에너지 소산지표 $E_s[E_s = E_c / 0.5 P_y \rho_y (1 + (A_s' / A_s)^2)]$, E_c : 총에너지소산량, P_y, ρ_y 는 각각 항복하중 및 변위, A_s', A_s 는 각각 압축 및 인장철근의 단면적이며 여기에서는 $A_s' = A_s$ 로서는 모형이 원형보다 1.16배 높게 나타났다.

5.3 접합부의 하중-변위 관계

수평접합부의 상하접합면을 비교하면 원형과 마찬가지로 1층 상부접합면과 2층 하부접합면에서 미끄러짐이 크게 나타났으나 광적으로는 원형과 다르게 나타났다. 최대 미끄러짐이 원형의 경우에는 2층 하부접합면에서 발생하였으나 모형은 1층 상부접합면에서 일어났다. 이는 1층 수평접합부철근의 단면결손에 의한 것이다. 이력곡선은 철근의 조기절단으로 나타난 양의 방향 사이클을 제외하고는 외형상 원형과 비슷한 양상을 나타냈다.

원형의 1층 수직접합부는 좌우의 접합부가 대칭적으로 안정된 거동, 소위, 날개벽이 인장을 받을 때는 전단저항이 증가하면서 안정된 소성거동을 나타내고, 압축시에는 거의 미미한 변형과 함께 탄성적으로 변형이 복구되는 양상이 반복되는 전형적인 이력거동을 하였으나, 모형은 한쪽은 원형과 같이 전형적인 거동을 나타냈고 다른 한쪽은 후기 단계에서 소성변위를 나타내는 거동을 하였다. 이렇게 서로 다른 거동은 실험체 조립시의 수직보강철근 및 횡보강철근의 시공불량 및 오차로 인한 철근의 조기 기능저하와 콘크리트와 수직보강철근의 부착력의 감소에 의한 것으로 판단된다. 이는 원형실험에서 측정되지 아니한 수직보강철근의 변형도곡선에서도 확인되었다.

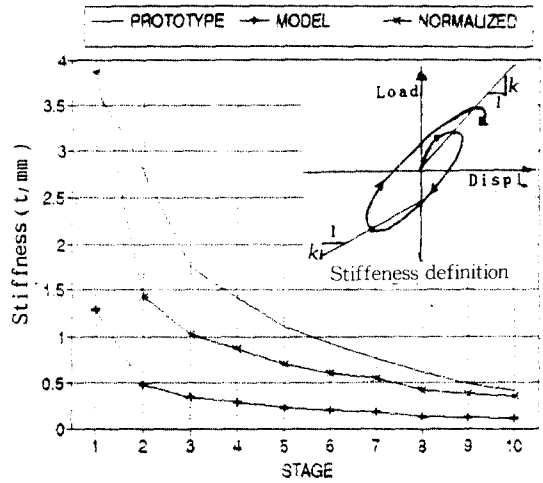


Fig. 9 Stiffness degradation

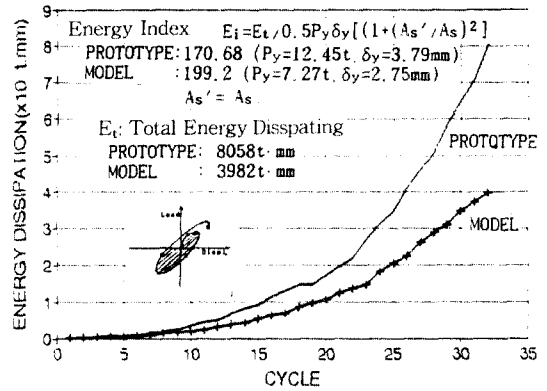


Fig. 10 Comparison of energy dissipation capacity

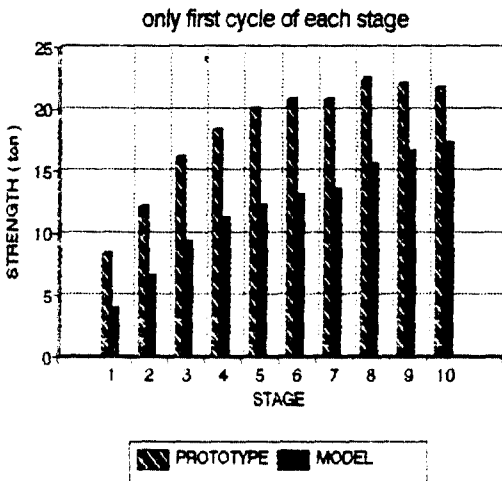


Fig. 8 Comparison of strength

6. 결론

1/3축적 모형구조체의 파괴모드 및 하중-변위 관계의 분석결과를 요약하면: 예상한 바와 같이 접합부는 작용하중에 민감하였다. 각 하중-변위 단계에서의 강성의 저하가 탄성범위내에서는 현저하지 않으나 비탄성으로 진행됨에 따라서 커지는 거동을 보였고, 변위의 증가와 함께 수직보강철근보다 수평접합부철근의 변형도가 더욱 증가하면서 응력이 수평접합부철근으로 점차적으로 전이되어 갔고, 하중이 증가하면서 벽보로 응력이 전달되어 가는 파괴기구를 형성하였다. 또한, 이러한 거동과 접합재료의 시공불량 및 오차로 판단되는 원인으로 양쪽 수직접합부가 각각 서로 다른 전단거동을

나타냈다. 일반적으로 이러한 거동이 프리캐스트 콘크리트 구조의 구조물전체의 거동을 지배하는 것으로 볼 수 있다. 이는 구조물 전체의 에너지소산이 주로 접합부와 벽보의 동작기구에 의해 이루어지고 있다고도 표현할 수 있다. 이와같은 분석 결과에 비추어, 축척모형실험에 있어서는 다음과 같은 사항이 고려된다면 실험체의 원형실험에 준하는 결과를 충분히 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

1. 모형 구조체실험에 의하여 어떤 현상을 규명하고자 할 때에는 가능한한 변수가 작은 왜곡모형을 선정하는 것이 상사성의 해석 및 신뢰성확보에 유리하다.
2. 프리캐스트 콘크리트 판구조의 모형실험을 통한 구조거동의 상사성은 접합부재료와 구조체의 파괴기구의 전이에 대한 예측부분(예: 벽보의 양단, 벽보의 중앙)의 모형화가 가장 중요하다.
3. 본 연구에서와 같이 자중 이외에는 수직하중이 작용하지 아니한 부분구조체(subassembly)의 모형실험에서는 실험후에 원형과 모형간의 자중에 의한 중력하중차에 대한 명확한 상사관계의 보정이 곤란하므로 인공 질량을 부착할 필요가 있다.
4. 보다 향상된 상사성 검토를 위하여는 원형과 모형재료의 왜곡에 대한 보정이 필요함으로 이에 대한 역학적인 성질의 왜곡량(deviation)을 확보할 필요가 있으며, 사용재료 및 구조체의 정밀하고 수준높은 제작이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Caceese, V., and Harris, H.G., "Report 2: Small-Scale Tests of Simple Precast Concrete Shear Wall Models Under Earthquake Loading", Department of Civil Engineering, Drexel University, December, 1984.
2. Darwin, D., and Nmal, C.K., "Energy Dissipation in RC Beams under Cyclic Load", Journal of Structural Div., ASCE, Vol. 112, NO.8, Aug., 1986.
3. Kim, W., El-Attar, A., and White, R.N., "Small-Scale Modeling Techniques for Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Loads", School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, November, 1988.
4. Mueller, P., "Hysteretic Behavior of Precast Panel Walls", Seminar on Precast Concrete Construction in Seismic Zones, Tokyo, Japan Concrete Institute, Vol. 1, October, 1986, pp.127-142.
5. Sabnis, G.M., Harry, H.G., White, R.N., and Mirza, M.S., "Structural Modeling and Experimental Techniques", Prentice-Hall Inc. Englewood Cliff, New Jersey, 1983.
6. 김우, 김대중, 강성후, "철근콘크리트구조 연구를 위한 소축척 구조 모형실험기법", 콘크리트학회 논문집, 제3권 제4호, 1991.12.
7. 윤재진, "횡하중을 받는 P.C판 조립식구조 Sub-assembly의 구조거동에 관한 실험적 연구", 박사과정 중간예비보고서, 1991.5.

(접수일자 : 1992. 5. 23)