

P.C. 대형판 구조물의 수평접합부 유효강성에 대한 정량적 분석

Quantitative Analysis on Effective Stiffness of Horizontal Joints in Precast Concrete Large Panel Structures

이한선*

장극관**

신영식***

Lee, Han Seon Chang, Kug Kwan Shin, Young Shik

요 약

프리캐스트 콘크리트 대형판 구조물에 있어서 접합부의 강성은 일반적으로 일체식 철근콘크리트 벽식구조물에 비하여 떨어지는 것으로 알려져 있으나 이들 강성에 대한 정량적인 값에 대한 정보가 매우 부족한 실정이다. 이 논문은 몇가지 실험으로부터 도출된 해석적 결과에 근거하여 특히 수평접합부의 압축강성에 관한 정량적 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다. 또한 접촉문제로부터의 접근에 의해 구해진 수평접합부의 압축강성값이 위에서 얻은 값들과 매우 유사함을 보여주고 있다.

Abstract

Though stiffnesses of joints in precast concrete(P.C.) large panel structures are known to be generally less than those in monolithic reinforced concrete wall structures, designers have very little information on the quantitative values with regards to these stiffnesses. The aim of this paper is to provide this quantitative information, in particular, on the compressive stiffness of horizontal joints, based on the analytical results derived from several experiments. Also, it is shown that the approach from the contact problem to determine this stiffness gives a value very similar to those obtained above.

Keywords : precast concrete, horizontal joint, vertical joint, effective stiffness

1. 서 론

1.1 연구의 배경과 목적

프리캐스트 콘크리트(precast concrete : P.C.) 대형판 구조물은 일체식 철근 콘크리트 벽식 구조물에 비해 접합부에서의 연속성이 저하되는

것이 일반적인 경향이다. 접합 상세에 따라 정 2 의 차이는 있을 수 있으나, 특히 상하 벽판과 그 사이의 바닥 슬래브로 구성되는 수평 접합부에서 구성 부재의 면이 완벽한 평면이 되지 못하고 제작에 따른 미소 굴곡이 발생하게 되며, 따라서 건식접합시스템에서와 같이, 이들 면이 직접 접하게 될 경우 이들면의 불규칙한 접합상태는 국부적인

* 정회원, 영남대학교 건축공학과 조교수

** 정회원, 삼성건설 기술연구소 선임연구원

*** 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1994년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

응력 집중현상을 발생시키게 된다. 또한 습식접합 시스템의 경우에도, 면사이에 접합용 모르타르나 현장 타설 콘크리트를 채우도록 되어있으나 현실적으로 밀실하게 채우는데 어려움이 많고 또 이들 재료가 밀실하게 채워졌을 때라고 하더라도 판과 접합재사이의 재료상의 이질성에 의해 접촉부분에서 미시적으로 응력을 많이 받는곳과 그렇지 않는곳이 발생하게 될것이다. 즉, P.C.대형판 구조물의 수평 접합부에서는 이러한 국부적 접촉 변형(local contact deformation)에 의해 비교적 큰 변형이 야기되며, 따라서 상대적으로 매우 큰 변형이 접합부에서 발생하여 전체 P.C.구조물의 강성을 현저히 떨어뜨리는 역할을 하고 있다. 국내 외에서 수행된 P.C.구조물에 대한 실험 결과와 일체식 구조물에 적용되는 재료역학적 계수를 사용하여 P.C.구조물의 기동을 해석적으로 예측한 값을 비교하여 보면 매우 큰 차이가 있음을 발견할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 수평 접합부의 유효 압축강성을 실험 결과에 근거하여, 해석적인 방법을 이용하여 정량적으로 도출해 내고자 하며, 타 연구 보고서나 관련 문헌에서 주어진 값과 비교하여, 도출된 유효 강성의 타당성을 보완 입증하고자 한다.

1.2 수평접합부 유효강성의 도출을 위한 가정

(1) P.C.대형판 구조물은 대체로 중력하중(gravity load)에 대해서는 모든 수평접합부가 압축상태에 있다고 볼 수 있다. 그러나, 지진하중 및 풍하중과 같은 횡하중(lateral load)이 작용할 때, (i)크기가 작을 경우 압축응력이 부분적으로 커지거나 작아지면서도 여전히 압축상태로 남아 있지만, (ii)횡하중의 크기가 어느정도를 넘어서면 일부분 인장응력을 받게 되어 수평접합부를 관통하는 철근등이 이를 부담하게 될 것이다. 본 논문에서는 P.C.대형판 구조물이 전체적으로 탄성 거동 범위에 있을 때는 수평접합부의 압축 및 인장거동시 일정한 탄성계수를 가진 물질로 이루어졌다고 가정한다. 물론 인장을 받았을 경우, 더 큰 강성의 저하가 예상되지만, (i)실무자의 해석 관

련성 등을 고려하고, (ii)인상에 의한 들뜸(gap) 부분이 전체적으로 일부분에 지나지 않으며, (iii)전체 수평접합부가 압축 및 인장을 통털어서 일정한 강성을 가진다고 보는것이 전체 구조물의 기동이 탄성 범위내에 있다면 인장측 들뜸에 의한 강성저하 효과를 충분히 합리적으로 반영할 수 있다고 보기 때문에 다소의 차이가 있더라도 이 가정을 도입하기로 한다.

(2) P.C.대형판 구조물의 접합부는 대별하여 수평접합부와 수직 접합부로 구분할 수 있다. 이 구조물의 변형이 벽체 내부 및 접합부에 걸쳐서 일어난다고 볼 때 수직접합부의 강성과 수평접합부의 강성이 전체 구조물의 변형에 끼치는 영향이 어떻게 다를 것인가 하는 점은 매우 큰 관심거리가 될 수 있다. 이에 관한 연구는 참고 문헌(1)서 Fig.1과 같은 I형 P.C.대형판 부분구조물에 대하여 수평 접합부와 수직접합부의 탄성계수를 각각 달리했을 때 지붕의 횡처짐에 대한 영향을 비교한 결과가 Table 1에 주어져 있다. 여기서 수직접합부의 재료탄성계수를 벽판의 1/45로 저하시켰을 경

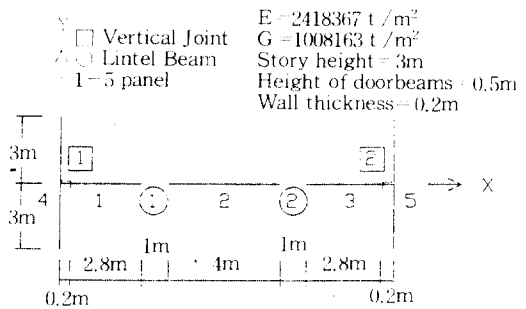


Fig. 1 I-Type 6-Story P.C. Shear Wall

Table 1 Roof deflections(4-node shell element of ADINA)
(unit : mm)

Model	Deflection
$E_{VJ} = E_P$	4.05
$E_{VJ} = 1/45E_P$	5.32
$E_{VJ} = 2/9E_P$	4.30
$E_{HJ} = 1/10E_P$	5.36
$E_{VJ} = 2/9E_P, E_{HJ} = 1/10E_P$	5.74

E_{VJ} : Young's Modulus of Vertical Joint

E_{HJ} : Young's Modulus of Horizontal Joint

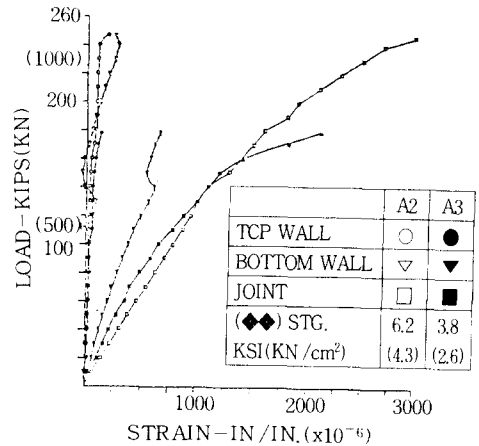
E_P : Young's Modulus of Panel

우, 즉 수직 접합부의 강성이 거의 무시된 경우의 결과와 수평접합부탄성계수를 1/10로 감소했을 때의 결과가 거의 일치하며 수직접합부 탄성계수를 벽판의 2/9로 하였을 때 지붕 횡처짐의 증가는 일체식에 비해 6%인 반면, 수평접합부의 탄성계수를 1/10로 감소시켰을 경우, 30%이상 횡처짐이 증가함을 보여주고있다. 일반적으로 수직 접합부의 강성은 수평접합부의 강성에 비하여 횡처짐에 대한 영향이 작은것으로 판단되며 또한 수직접합부의 전단강성저하량이 수평접합부의 그것에 비해 상대적으로 훨씬 작을 것으로 예상된다. 수직접합부의 강성에 대한 실험적 자료가 부족한 현 상태에서 다소의 논리적 비약이 있을 수 있겠으나 본 논문에서는 수직접합부의 강성은 벽체의 강성과 동일한 것으로 가정하고 수평접합부에서의 탄성계수값만을 조정하여 실험결과치에 근접한 횡처짐을 나타내는 값을 해석적으로 구하여 이를 수평접합부의 유효강성으로 보았다.

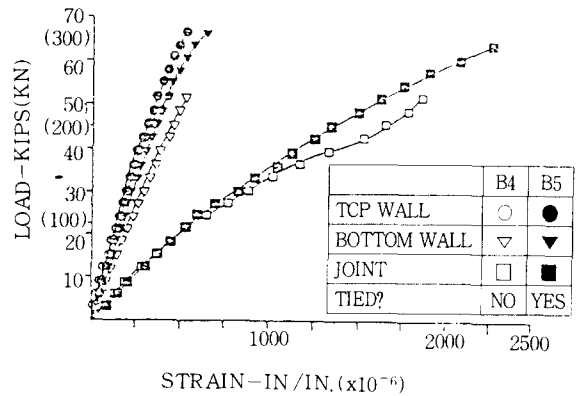
2. 실험 결과에 의한 수평 접합부 유효강성

2.1 수평 접합부의 압축 실험

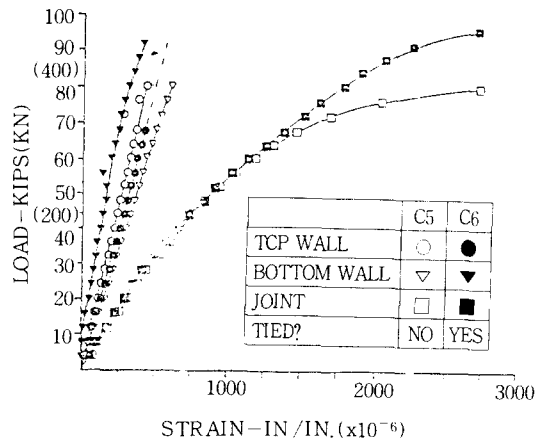
H.G.Harris⁽²⁾는 3(A,B,C)종류의 수평 접합부에 대한 압축 실험을 수행하였다. 접합부 A는 실험크기로서 벽판넬의 단면이 $t \times L=8 \times 10$ inch이며 접합부 B는 1/2축소모델로서 벽판넬의 단면이 $t \times L=4 \times 4.25$ inch이나 접합부C는 같은 1/2축소모델이나 벽판넬의 가력단면이 $t \times L=4 \times 7.25$ inch로 증가되어 있는 시험체이다. 슬래브는 공히 중공 슬래브를 사용하였고 닫힌 형태(closed-type)접합부이다. 이 실험 결과 얻은 상부벽, 하부벽 및 접합부에서의 압축 하중-변형률 관계가 Fig.2에 주어져 있다. 여기서 접합부의 하중-변형률 커브의 기울기가 상·하부 벽체의 기울기에 비해 두드러지게 완만한 것을 발견할 수 있다. 즉 벽판의 압축강성이 A시리즈 경우 10배 이상, B시리즈는 4배, C시리즈는 3배정도 접합부의 압축강성보다 상대적으로 높은 것으로 나타나고 있다.



(a) A series

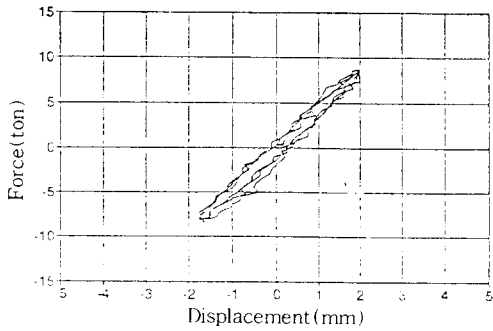


(b) B series

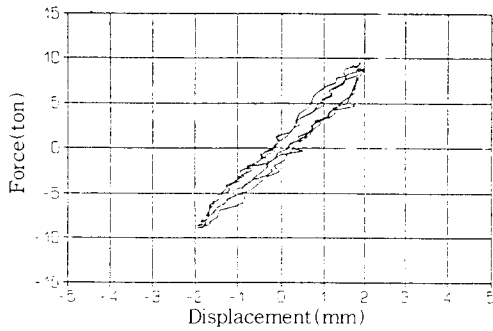


(c) C series

Fig. 2 Compressive load-strain curves



(a) Dry joint



(b) Wet joint

Fig. 6 Hysteretic curves of load-displacement for 2-story prototype subassembly

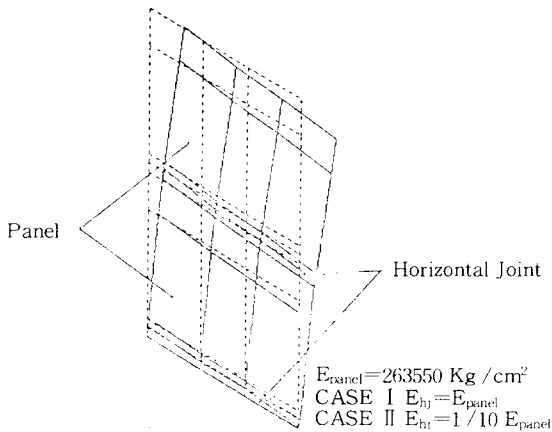


Fig. 7 Modeling of prototype subassembly

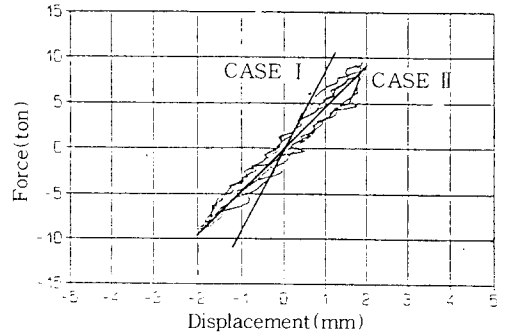


Fig. 8 Comparison of analytical and experimental results of root lateral displacement

2.3 1/3축소 3층 입체 P.C.모델의 진동대 실험^(3,4)

이 실험에 사용된 실험체의 평면 및 입면이 Fig.9에 나타나 있으며 습식접합시스템에 대한 자유진동실험 및 주변진동(ambient vibration) 실험결과가 Table 2에 주어져 있다. 이 시험 모델에 대하여 SAP90⁽⁵⁾을 이용하여 수립한 모델이 Fig.10에 있다. 여기서 바닥판은 강체로 가정하여 수평으로 매우 큰 강성, 수직으로는 매우 작은 강성을 가진 가상보를 층 및 수평접합부 상단에 설치

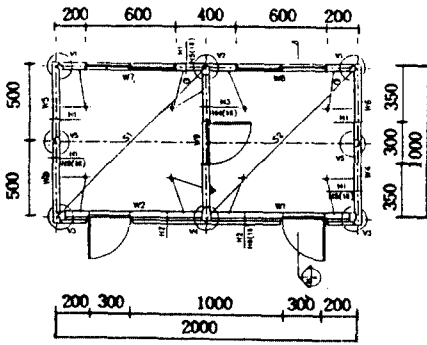
Table 2 Natural periods and damping ratios of 1/3-scale 3-story wet-jointed P.C. model

	Free vibration test				Ambient Test	
	T(sec)	ξ	T(sec)	ξ	T(sec)	ω (Hz)
	+		-			
before test	0.0795	4.0%	0.0789	12.3%	0.0735	13.6
after PGA 6%, before PGA 12%	0.0824	10.5%	0.084	8.6%		
after PGA 12%, before PGA 25%	0.063	5.9%	0.0838	8.1%	0.077	12.98
after PGA 25%, before PGA 40%	0.077	7.8%	0.0796		0.0772	12.95
after PGA 40%, before PGA 60%	0.085	7.3%	0.0876	10.4%	0.084	11.90
after PGA 60%					0.088	11.36

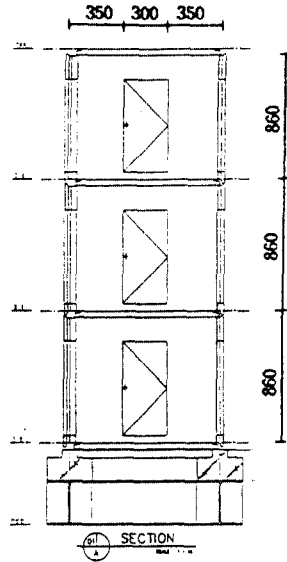
Table 3 Natural period

(unit : sec.)

	experiment	analysis(SAP90)
natural period	0.0795	0.063($E_{HJ} = (1/10)E_p$) 0.097($E_{HJ} = (1/40)E_p$)



(a) Plan



(b) Elevation

Fig. 9 1/3-Scale 3-Story P.C. model

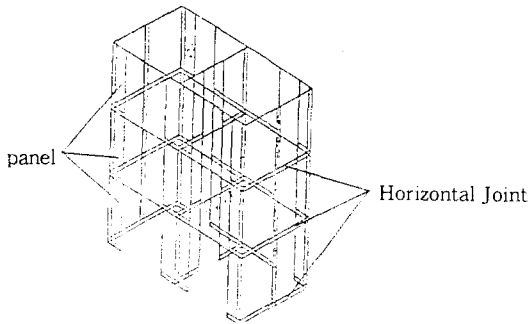


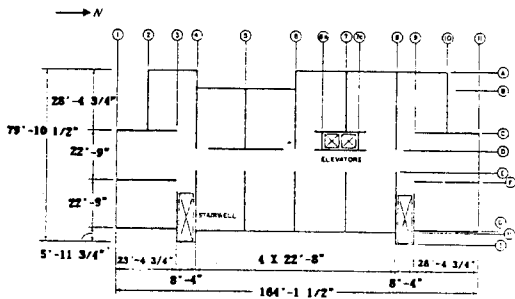
Fig. 10 Analytical modeling 1/3-scale 3-story P.C. model using SAP90

치하였고 각 전단벽 피어(pier)마다 비틀림에만 저항하는 가상기둥을 설치하였다. 판넬콘크리트의 탄성계수는 $210t/cm^2$ 으로 하고 수평접합부는 이의 1/10인 $21t/cm^2$, 수직접합부는 이의 1/40인 $5.25t/cm^2$ 을 적용하였을 때 얻어진 고유주기가 Table 3에 나타나 있다. 여기서 실험결과 얻어진 값 0.0795초는 수직접합부의 강성을 벽판의 1/40로 거의 무시한 가운데에도 수평접합부 탄성계수가 판넬의 1/10인 값일 때 0.063초, 1/40인 값일 때의 0.097초 사이에 위치함으로써 최소한

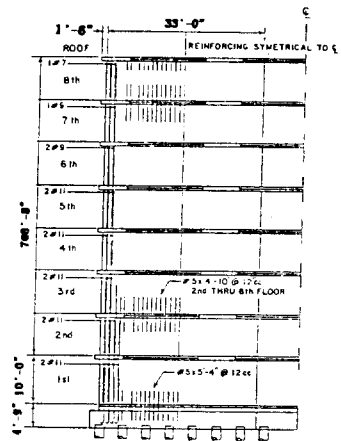
수평접합부의 강성이 판넬의 1/10이하임을 보여 주고 있다.

2.4 8층 실물 P.C.아파트의 현장(field) 동적 시험

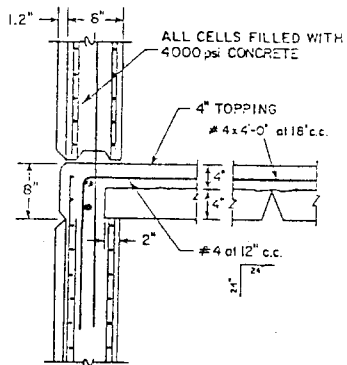
Bouwkamp⁽⁶⁾이 Fig.11과 같은 실존하는 P.C. 아파트에 대해서 강제진동(forced vibration)시험 및 주변진동(ambient vibration)시험을 현장에서 실시하여 구한 고유주기와 고유모드가 Fig.12에 나타나 있다. 이 실험에 대해서는 ETABS 프로그램⁽⁷⁾을 사용하여 수평접합부의 강성을 유추해 보았다. ETABS에서는 기초지반의 강성을 가상층(dummy story)으로 조정하게 되어 있다. 따라서 우선 실험에 의해 구해진 지반의 횡(lateral) 및 회전(rotational)강성을 맞추기 위해 이 가상층의 높이를 적절히 조정할 필요가 있다. Table 4에 지하 가상층의 높이에 따른 횡 및 회전 강성이 실험치와 함께 주어져 있다. 이 표에서 NS방향의 회전 강성에 관한 실험치가 상대적으로 매우 유연한 것으로 나타나 이 값을 만족시키기 위해서는 약 300ft 이상 높이의 가상층이 필요하고, 이렇게 될



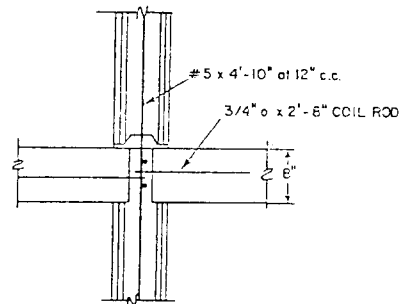
(a) Plan



(b) Elevation



(c) External Joint



(d) Internal Joint

Fig. 11 8-story P.C. apartment building

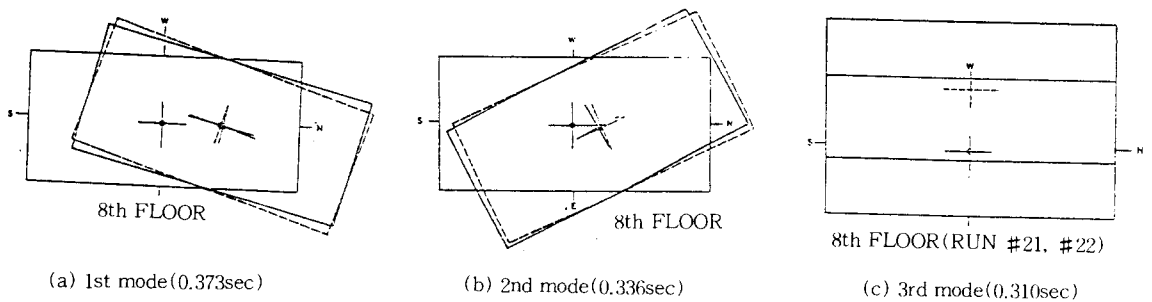


Fig. 12 Natural periods and modes of 8-story P.C. apartment building(Experiment)

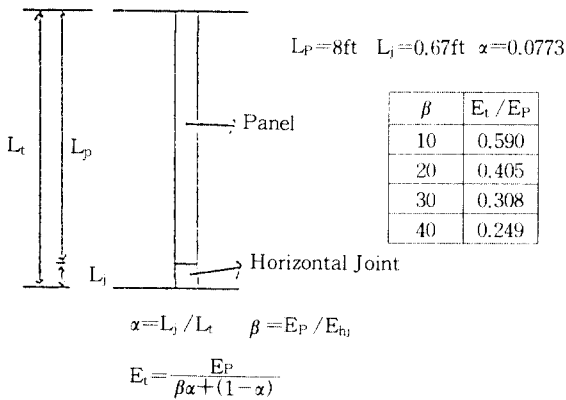
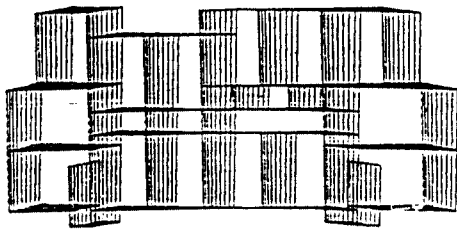
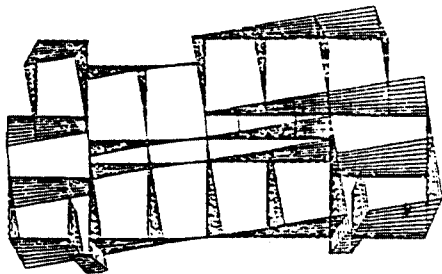


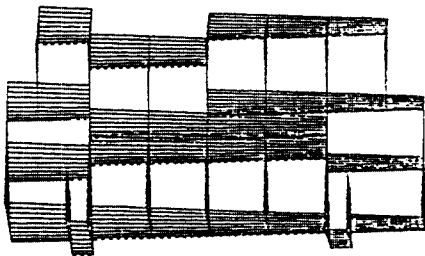
Fig. 13 Derivation of equivalent Young's modulus of wall



(a) 1st mode(0.367sec)



(b) 2nd mode(0.332sec)



(c) 3rd mode(0.264sec)

Fig. 14 Natural periods and modes of 8-story P.C. apartment building(Analysis)

Table 4 Change of lateral and rotational stiffness due to the variation of height of dummy story H

	EW			NS		
	H (ft)	KLAT (Kips/ft)	KROT (Kips ft /rad)	H (ft)	KLAT (Kips/ft)	KROT (Kips ft /rad)
EXPERIMENT		8.7×10^6	3.7×10^6		11.5×10^6	1.8×10^6
ANALYTICAL MODEL	3	16.6×10^6	2.2×10^{10}	3	12.5×10^6	1.27×10^{11}
	6	8.3×10^6	1.34×10^{10}	6	5.88×10^6	8.48×10^{10}
	10	4.76×10^6	9.4×10^9	10	3.57×10^6	5.66×10^{10}
	20	2.27×10^6	5.4×10^9	20	1.75×10^6	3.39×10^{10}
	30	1.4×10^6	3.88×10^9	30	1.15×10^6	2.3×10^{10}

Table 5 Comparison of analytical and experimental results

$E_p=576000\text{KSF}$ $E_Q=340000\text{KSF}$ (Unit : sec)

모	$H_D=0$	$H_D=20\text{ft}$	$H_D=20\text{ft}$	EXPERIMENT	
드	$E_t=E_p$	$E_t=E_p, E_D=E_p$	$E_t=E_Q, E_D=E_p$	Forced	Ambient
1	0.261	0.292	0.367	0.373	0.366
2	0.210	0.268	0.332	0.339	0.333
3	0.175	0.219	0.264	0.310	0.305

E_p : Modulus of Elasticity of Panel(See Fig.13)

E_D : Modulus of Elasticity of Dummy story

E_t : Equivalent Modulus of Elasticity of Whole Story (See Fig.13)

경우 기타 부분의 강성이 맞지 않게 되어, 그 중 주어진 실험치들에 가장 접근하는 것으로서 높이 20ft의 경우를 선택하였다. Table 5에 가상층이 없는 경우, 가상층의 높이가 20ft인 경우, 구조물 전체의 탄성계수도 판넬의 것과 동일시 하였을 때의 고유주기가 주어져 있다. 이 고유주기들은 여전히 실험치와 맞지 않는 것을 알 수 있다. 따라서, 수평집합부 탄성계수가 벽판의 탄성계수의 1/10로 가정했을 경우, 전체 구조물에 균등히 적용할 수 있는 등가탄성계수를 직렬 스프링의 힘-변위 관계를 이용하여 Fig.13과 같이 산출하였다. 이 값을 상부구조에 적용하였을 때 얻어진 값이 Table 5의 네번째 난에 주어져 있으며 실험치와 매우 유사한 값을 보여줌을 알 수 있다. 그러나 Fig.14에서 보는 바와 같이 모드형태가 여전히 정확히 일치하고 있지는 않다.

3. 수치적 방법에 의한 수평접합부 유효강성

3.1 접촉문제에 의한 등가탄성계수 산정법⁽⁸⁾

F. Bljoger는 수평접합부의 변형을 서론에서 언급하였듯이 접촉문제(contact problem)로 보고, 층고 전체에 걸친 등가탄성계수(E)를 다음과 같은 공식에 의해 구하였다.

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{\lambda_m}{H}} \quad (1)$$

여기서 E_c 는 판넬콘크리트의 탄성계수이고 H 는 층고이며 λ_m 는 층고에 해당하는 수평접합부의 유연성(deformability)으로서 다음과 같이 구한다.

$$\lambda_m = \sum \lambda_{mj} \quad (2)$$

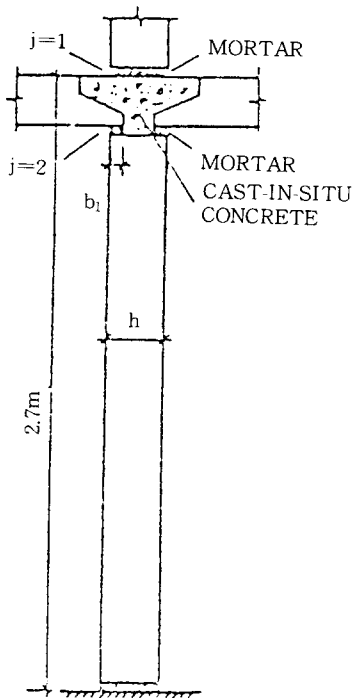


Fig. 15 An example for the calculation of equivalent young's modulus of wall

Table 6 Deformabilities of different joints in compression in m/MPa

Type of Joint	Joint diagram	Grade of mortar or concrete in contact of precast elements		
		up to 1MPa	5 MPa	10 MPa and more
In walls	PRECAST PANELS MORTAR	1×10^{-4}	0.6×10^{-4}	0.4×10^{-4}
	CAST-IN-SITU CONCRETE PRECAST PANEL	-	-	0.2×10^{-4}

$$\lambda_{mj} = \frac{1}{\sum_i \frac{n_i}{\lambda_{mo}}} \quad (3)$$

여기서 n_i 는 같은 수평면에 위치한 동일접합면의 개수이며, λ_{mo} 는 벽두께(h)와 접합면 폭(b_i)과 다음의 관계에 있다.

$$\lambda_{mo} = \lambda_{mj} \frac{h}{b_i} \quad (4)$$

또한 여기서 λ_{mj} 는 Table 6에 나타나 있는 재료의 기본유연성(deformability)을 의미한다. 예로서 Fig.15와 같은 벽체에 대해, ($h=0.15m$, $0.3m$, $E_c=32GPa$, $H=2.7m$, 모르터 강도 10MPa의 경우),

(i) 모르터 층 (Fig.15에서 $j=1$ 층)에 대해,

$$\lambda_{mj} = 0.4 \times 10^{-4} \frac{m}{MPa} \quad (\text{Table 6에 의해})$$

(ii) 슬래브 지지부분 (Fig.15에서 $j=2$ 층)에 대해, 식 (3) 및 (4)에 의해

$$(n_1=2, n_2=1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{m2} &= \frac{1}{\frac{2}{0.4 \times 10^{-4}} \times \frac{b}{h} + \frac{h-2b_1}{h} \times \frac{1}{0.2 \times 10^{-4}}} \\ &= 0.25 \times 10^{-4} \frac{m}{MPa} \end{aligned}$$

층 층고에 대한 접합부의 유연성(deformability)은 식 (2)에 의해

$$\lambda_m = \lambda_{m1} + \lambda_{m2} = 0.65 \times 10^{-4} \frac{m}{MPa} \text{이며,}$$

따라서 유효탄성계수 E는 식 (1)에 의해

$$E = \frac{1}{\frac{10^{-3}}{32} + \frac{0.65 \times 10^{-4}}{2.7}} = 18.1 \times 10^3 \text{ (MPa)로}$$

주어진다.

이 계산결과 나타난 유효등가탄성계수 $E=0.566E_c$ 로서 Fig.13에서 수평접합부의 탄성계수를 벽관의 1/10로 보고 도출한 $E=0.590E_c$ 와 매우 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

3.2 기타문헌

Fintel과 Ghosh⁽⁹⁾는 수평접합부를 기균열평면 (precracked plane)으로 보는 것이 P.C.시공과정과 크리프 및 수축현상을 고려할 때 합리적이라고 보고 있다. 또한 플랫폼(platform) 수평접합부는 일체식 벽구조에 비하여 압축강도면에서 벽관의 50~60% 정도로, 또 압축강성면에서 50% 이하로 감소되는 것이 실험에 의해 밝혀졌다고 언급하고 있다. 또한 A.Cholewicki⁽¹⁰⁾는 P.C.전단벽 해석에서 수평접합부의 영향을 고려하기 위해 참고문헌⁽¹¹⁾에 따라 $E=0.65E_c$ 라는 값을 등가탄성계수로 사용하였다.

4. 결 론

P.C.대형판 구조물의 수평접합부 압축강성을 실험결과의 분석과 문헌조사를 통하여 정량적으로 도출하여 보았다. 실험결과의 분석에 의하면 수평접합부의 유효탄성계수는 벽관의 탄성계수에 비해 최소한 1/10이하로 감소되는 것으로 나타났다. 또한 F.Bljucer의 접촉문제에 의한 수평접합부의 유연성(deformability) 도출과 이를 감안하여 계산된 전체 벽체의 등가탄성계수도 역시 실험결과 분석에 의한 등가탄성계수와 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. 따라서 P.C대형판 구조물의 해석시 수평접합부의 이러한 낮은 강성이 반영하여 최소한 벽관 콘크리트 탄성계수의 1/10이하의 탄성계수를 수평접합부에 적용시키거나, 전체 구

조물의 탄성계수를, 일체식 구조물의 경우에 비해 약 60%정도로 감소시켜 적용함이 합리적이라고 여겨진다.

참 고 문 헌

1. 삼성건설 기술연구소, "P.C.대형판 구조물의 접합부 전산해석 모델연구," 1993.11
2. Harry G.Harris and Srikanth Iyenger, "Full-Scale Tests on Horizontal Joints of Large Panel Precast Concrete Buildings," PCI, March-April 1980.
3. 대한주택공사, "P.C.아파트의 내진설계 기준 제정을 위한 실험연구," 1991, 12.
4. 이한선, "1/3축소 3층 습식접합 프리캐스트 콘크리트 대형판 입체구조물의 진동대 실험," 콘크리트학회지 제5권 1호, 1993,3.
5. SAP90, Three Dimensional Analysis of Building Systems, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 1989.
6. J.G.Bouwkamp, J.P.Kollegger and R.M.Stephen, "Dynamic Properties of an Eight-Story Prefabricated Panel Buildings," UCB/EERC-80/30,1980.
7. ETABS, Three Dimensional Analysis of Building Systems, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 1989.
8. F.Bljucer, "Design of Precast Concrete Structures," Ellis Horwood Limited, 1988.
9. Mark Fintel and S.K.Ghosh, "The Seismic Design of Large Panel Coupled Wall Structures," Proceedings of Workshop on Design of Prefabricated Concrete Buildings for Earthquake Loads, ATC-8, April 1981.
10. A.Cholewicki, "Analysis of Shear Walls," Swedish Council for Building Research, D4 : 1985, P109.
11. Lewicki and Others, "Budyunki Wznoszone Metodami Uprzemystowionymi," Warszawa, Arkady 1979.

(접수일자 : 1994. 2. 24)