

프리캐스트 콘크리트 대형판구조물의 수평접합부 유효강성

Effective Stiffness of Horizontal Joints in Precast Concrete Large Panel Structures

장극관* 이한선** 신영식*** 류진호****
Chang, Kug-Kwan Lee, Han-Seon Shin, Young-Shik Ryoo, Jin-Ho

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.

1. 서론

프리캐스트 콘크리트(precast concrete: P.C.)대형판 구조물은 일체식 철근콘크리트 벽식 구조물에 비해 접합부에서의 연속성이 저하되는 것이 일반적인 경향이다. 접합상세에 따라 정도의 차이는 있을 수 있으나, 특히 상하 벽판과 그 사이의 바다 스타브로 구성되는 수평접합부에서 구성 부재의 면이 완벽한 평면이 되지 못하고 제작에 따른 미소굴곡이 발생하게 되며, 따라서 이들 면이 만나는 부분에서의 미소 간극을 접합용 채움 모르타르나 현장 타설 콘크리트가 밀실하게 채우는 것은 현실적으로 매우 어려울 때가 많다. 즉, P.C. 대형판 구조물의 수평접합부에서는 이러한 국부적 접촉변형(local contact deformation)에 의해 비교적 큰 변형이 접합용 모르타르나 콘크리트에 야기되며, 따라서 상대적으로 매우 큰 변형이 접합부에서 발생하여 전체 P.C. 구조물의 강성을 현저히 떨어뜨리는 역할을 하고 있다. 국내외에서 수행된 P.C. 구조물에 대한 실험 결과와 일체식 구조물에 적용되는 재료역학적 계수를 사용하여 P.C. 구조물의 거동을 해석적으로 예측한 값을 비교하여 보면 매우 큰 차이가 있음을 발견

할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 수평접합부의 압축 강성을 실험결과에 근거하여 정량적으로 도출해내고자 하며, 타 연구보고나 관련 문헌에서 주어진 값과 비교하여, 도출된 유효강성의 타당성을 보완 입증하고자 한다.

2. 실험결과에 의한 수평접합부 유효강성

2.1 수평접합부의 압축실험

H. G. Harris⁽¹⁾는 3(A, B, C)종류의 수평접합부에 대한 압축실험을 수행하였다. 이 실험결과 얻은 상부벽, 하부벽 및 접합부에서의 압축 변형률 - 하중 관계가 (그림.1)에 주어져 있다. 여기서 접합부의 하중 - 변형률 곡선의 기울기가 상, 하부 벽체의 기울기에 비해 두드러지게 완만한 것을 발견할 수 있다. A시리즈경우 10배 이상, B시리즈는 4배, C시리즈는 3배정도 벽판의 강성이 높은 것으로 나타나고 있다.

2.2 실물크기 2층 부분구조물 정적실험^{(2), (3)}

대한주택공사 주택연구소에서 수행한 P.C. 대형판 구조물의 2층 부분구조 정적실험 광경이 (사진.1)에 나타나 있다. 이 실험은 1/3축소 3층 입체 P.C. 모델의 상사성을 확인하기 위해 (그림.2)의 실물크기 및 1/3축소 시험체에 대하여 (그림.3)의 변위이력을 가하여 그 거동을 비교하기 위한 것이었다. 이 실험은 (그림.4)에 나타난 건식접합시스템과 습식접합시스템의

* 삼성건설 기술연구소 선임연구원
** 영남대학교 건축공학과 전임강사
*** 영남대학교 토목공학과 부교수
**** 영남대학교 토목공학과 석사과정

2개 시험체에 대하여 수행되었으며 실물크기 시험체에 대한 첫번 단계의 3사이클 변위 이력에 대한 하중-변위이력 곡선이 (그림.5)에 주어져 있다.

이 부분 구조물을 2차원 평면응력 요소로 모델한 것이 (그림.6)에 나타나 있다. 여기서 재료의 탄성계수로서 벽판(바다판)의 것을 사용, 일체식 구조물로 해석하였을 때의 2층 지붕에서의 처짐과 하중관계가 (그림.7)에 주어져 있다. 여기서 실험결과와 기울기와 매우 큰 차이가 있음을 발견할 수 있다. 한편 수평접합부의 탄성계수를 판넬 탄성계수의 1/10로 줄여서 얻어진 해석결과는 실험결과와 매우 근사함을 보여주고 있다.

2.3 1/3축소 3층 입체 P.C.모델의 진동대 실험^{(2),(3)}

이 실험에 사용된 시험체의 평면 및 입면이 (그림.8)에 나타나 있으며 습식접합시스템에 대한 자유진동실험 및 주변진동(ambient vibration) 실험결과가 (표.1)에 주어져 있다. 이 시험 모델에 대하여 SAP90⁽⁴⁾을 이용하여 수립한 모델이 (그림.9)에 있다. 여기서 바다판은 강체로 가정하여 수평으로 매우 큰 강성, 수직으로는 매우 작은 강성을 가진 가상보를 층 및 수평접합부 상단에 설치하였고 각 전단벽 피어(pier)마다 비틀림에만 저항하는 가상기둥을 설치하였다. 판넬콘크리트의 탄성계수는 210t/cm²으로하고 수평접합부는 이의 1/10인 21 t/cm² 수직접합부는 이의 1/40인 5.25t/cm²을 적용하였을 때 얻어진 고유주기가 (표.2)에 나타나 있다. 여기서 실험결과 얻어진 값 0.0795초는 수평접합부 탄성계수가 판넬의 1/10인 값일 때 0.063초, 1/40인 값일 때의 0.097초 사이에 위치함으로써 최소한 수평접합부의 강성이 판넬의 1/10이하임을 보여주고 있다.

2.4 8층 실물 P.C.아파트의 현장(field) 동적 시험

참고문헌(5)에서 (그림.10)과 같은 P.C.아파트에 대해서 강제진동(forced vibration)시험 및 주변진동(ambient vibration)시험을 현장에서 실시하여 그 고유주기와 고유모드가 (그림.11)에 나타나 있다. 이 실험에 대해서는 ETABS 프로그램⁽⁶⁾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. (표.3)에 지하 가상층의 높이에 따른 횡 및 회전 강성이 실험치와 함께 주어져 있다. 이 표에서 NS방향의 회전강성에 관한 실험치가 상대적으로 매우 유연한 것으로 나타나 이 값을 만족시키기 위해서는 약 300ft이상 높이의 가상층이 필요하고 이렇게 될 경우 기타 부분의 강성이 맞지 않게 되어, 그 중 주어진 실험치들에 가장 접근하는 것으로서 높이 20ft의 경우를 선택하였다. (표.4)에 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 알수있다. 따라서, 수평접합부 탄성계수가 벽판의 탄성계수의 1/10로 가정했을 경우, 전체 구조물에 균등히 적용할 수 있는 등가탄성계수를 (그림.12)와 같이 하여 산출하였다. 이 값을 상부 구조에 적용하였을 때 얻어진 값이 (표.4)에 세번째 난에 나타나 있으며 실험치와 매우 유사한 값을 보여줌을 알수있다. 그러나 모드형태는 여전히 정확히 일치하지 않고 있다.(그림.13)

3. 관련문헌에 의한 수평접합부 유효강성

3.1 F.Bljuger의 등가탄성계수 산정법⁽⁷⁾

F.Bljuger는 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.

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

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

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

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

또한 여기서 λ_{mi} 는 (표.5)에 나타나 있는 재료의 기본유연성(deformability)을 의미한다.

예로서 (그림.14)와 같은 벽체에 대해,

($h = 0.15m$, $b_1 = 0.03m$, $E_c = 32GPa$,
 $H = 2.7m$, 모르타르강도 $10MPa$ 의 경우),

(i) 모르타르 층 (그림에서 $j = 1$ 층) 에 대해,

$$\lambda_{m1} = 0.4 \times 10^{-4} \frac{m}{MPa} \text{ (표.5에 의해)}$$

(ii) 스라브 지지부분 (그림에서 $j = 2$ 층) 에 대해,

식 (3) 및 (4)에 의해 ($n_1 = 2$, $n_2 = 1$)

$$\lambda_{m2} = \frac{1}{\frac{2}{0.4 \times 10^{-4}} \times \frac{b}{h} + \frac{h-2b_1}{h} \times \frac{1}{0.2 \times 10^{-4}}}$$

$$= 0.25 \times 10^4 \frac{m}{MPa}$$

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 E 는 식(1)에 의해

$$E = \frac{1}{\frac{10^{-3}}{32} + \frac{0.65 \times 10^{-4}}{2.7}} = 18.1 \times 10^3$$

(MPa)로 주어진다.

이 계산결과 나타난 유효등가탄성계수 $E = 0.566E_c$ 로서 (그림.12)에서 도출한

$E = 0.590E_c$ 와 매우 유사한 값을 나타냄을 알 수있다.

3.2 기타문헌

참고문헌(8)에서 Fintel과 Ghosh는 수평접합부를 기균열평면(pre-cracked plane)으로 보는 것이 P.C. 시공과정과 크리프 및 수축현상을 고려할때 합리적이라고 보고있다. 또한 Platform형 수평접합부는 일체식 벽구조에 비하여 수직 압축강도면에서 벽판의 50~60%정도로 낮으며, 수직변형강성면에서 50%이하로 낮은 것으로 실험에 의해 밝혀졌다고 언급하고 있다.

4. 결론

P.C. 대형판 구조물의 수평접합부 압축강성을 실험결과와 분석과 문헌조사를 통하여 정량적으로 도출하여 보았다. 실험결과와 분석에 의하면 수평접합부의 탄성계수는 벽판의 탄성계수에 비해 최소한 1/10이하로 감소되는 것이

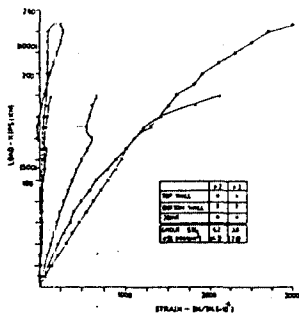
확실하다. 또한 F.Bljoger의 접촉문제에 의한 수평접합부의 유연성(deformability) 도출과 이를 감안하여 계산된 전체 벽체의 등가탄성계수도 역시 실험결과 분석에 의한 등가탄성계수와 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. 따라서 P.C대형판 구조물의 해석시 수평접합부의 이러한 낮은 강성이 반드시 반영되어야 하고 최소한 벽판 콘크리트 탄성계수의 1/10이하의 탄성계수를 수평접합부에 적용시키거나, 전체 구조물의 탄성계수를, 일체식 구조물의 경우에 비해 약 60%정도로 감소시켜 적용함이 합리적이라고 사료된다.

감사의 글

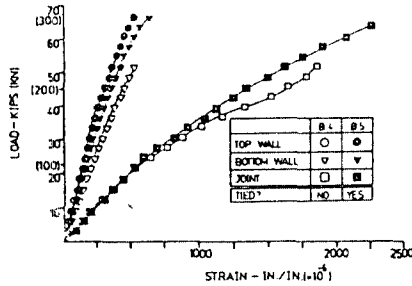
본 연구는 삼성건설주식회사의 산학협동연구 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 이 지원에 대해 감사한다.

참고문헌

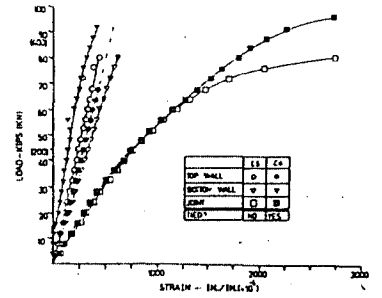
- (1) Harry G. Harris and Srikanth Iyenger, "Full-Scale Tests on Horizontal Joints of Large Panel Precast Concrete Buildings," PCI, March-April 1980.
- (2) 대한주택공사, "P.C. 아파트의 내진설계 기준 제정을 위한 실험연구," 1991, 12.
- (3) 이 한선, "1/3축소 3층 습식접합 프리캐스트 콘크리트 대형판 입체구조물의 진동대 실험," 콘크리트학회지 제5권1호 1993, 3.
- (4) SAP90, Three Dimensional Analysis of Building Systems, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 1989.
- (5) J.G. Bouwkamp, J.P. Kollegger and R.M. Stephen, "Dynamic Properties of an Eight-Story Prefabricated Panel Buildings," UCB/EERC-80/30, 1980.
- (6) ETABS, Three Dimensional Analysis of Building Systems, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 1989.
- (7) F.Bljoger, "Design of Precast Concrete Structures," Ellis Horwood Limited, 1988.
- (8) Mark Fintel and S.K. Ghosh, "The Seismic Design of Large Panel Coupled Wall Structures," Proceedings of a Workshop on Design of Prefabricated Concrete Buildings for Earthquake Loads, ATC-8, April 1981.



A



B



C

그림.1 상부벽, 하부벽 및 결합부에서의 압축 변형률-하중관계

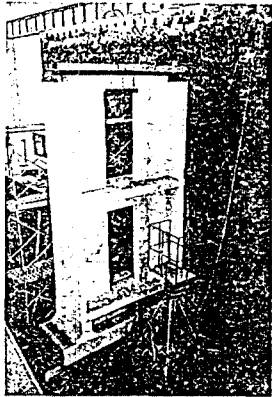


사진.1 2층 부분구조 정적실험장경

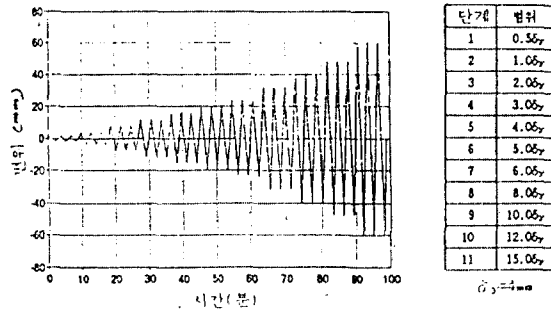


그림.3 변위이력

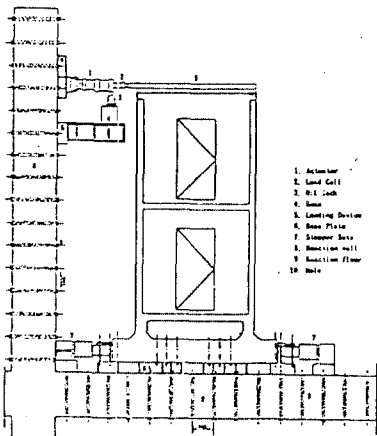


그림.2 실험기기 2층 부분구조물의 Setup

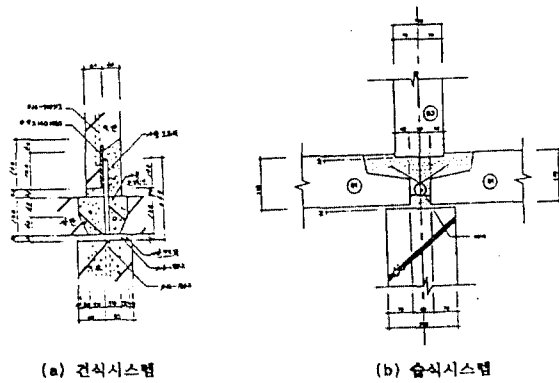
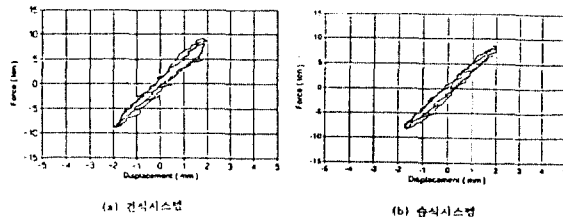


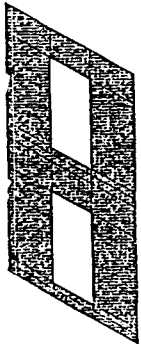
그림.4 시스템별 수직결합부 상세



(a) 견식시스템

(b) 흡식시스템

그림.5 실험기기 시험체에 대한 하중-변위이력곡선



-가정-

(1) 전체를 Plane Stress로 가정

(2) 수평전단부:
 $E = 21,000 \text{ kg/cm}^2$

그림.6 부분구조물의 2차원 평면응력요소모델

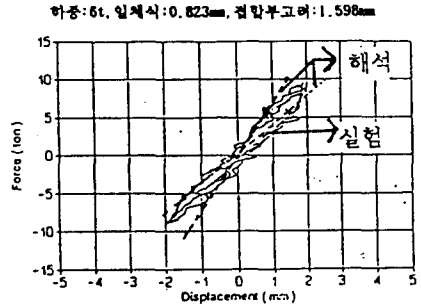


그림.7 2층지붕 평면위의 해석 및 실험결과와의 비교

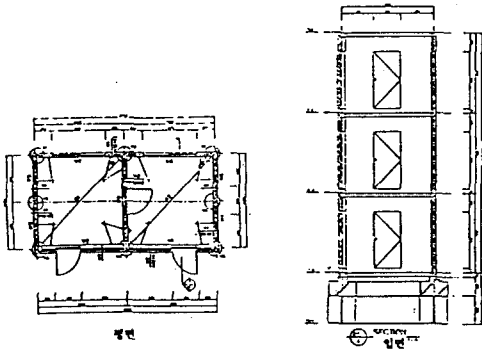


그림.8 1/3축소 3층 입체 P.C. 모델의 진동대실험에 사용된 시험체

표.1 습식접합시스템에대한 자유진동 및 주변진동실험결과

	자유진동실험				주변진동실험	
	고유주기 (초)	감쇠 계수 (%)	고유주기 (초)	감쇠 계수 (%)	고유주기 (초)	고유기속도 (Hz)
저진동을 실험 이전	0.0795	4.44	0.0788	19.72	0.0725	13.4
PCA 6이후, PCA 12이전	0.0834	15.72	0.084	11.22		
PCA 12이후, PCA 25이전	0.083	7.04	0.0838	10.54	0.077	12.94
PCA 25이후, PCA 40이전	0.077	10.06	0.0796	86.72	0.0772	12.95
PCA 40이후, PCA 60이전	0.085	9.04	0.0876	15.04	0.084	11.97
PCA 60이후					0.088	11.36

PCA : 최대 지진가속도 (Peak Ground Acceleration)

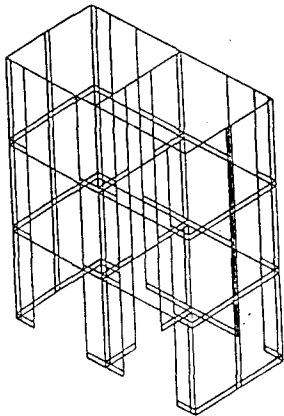


그림.9 1/3축소 3층 P.C. 모델에 대한 SAP90을 이용하여 수립한 모델

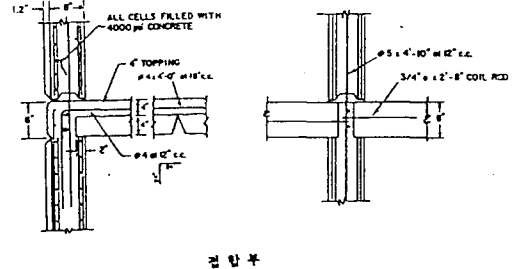
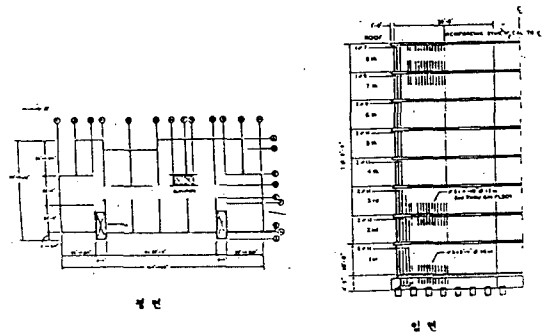


그림.10 8층 실물 P.C. 아파트

표.2 고유주기

	실 험	해석(SAP90)
고유주기 (SEC)	0.0795	0.083($E_{M1}=(1/10)E_c$) 0.097($E_{M1}=(1/40)E_p$)

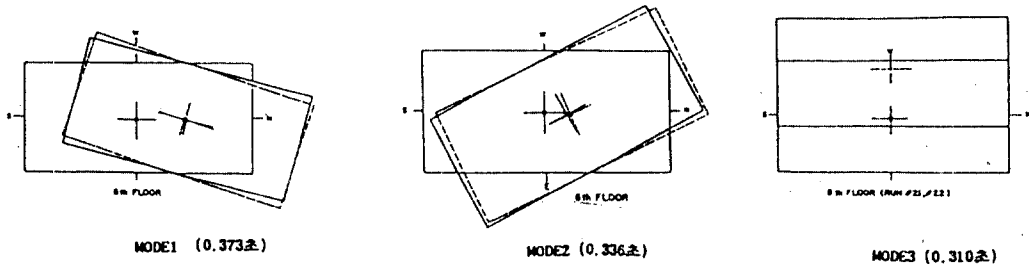


그림.11 8층 실물 P.C.아파트의 고유주기와 고유모드(실험)

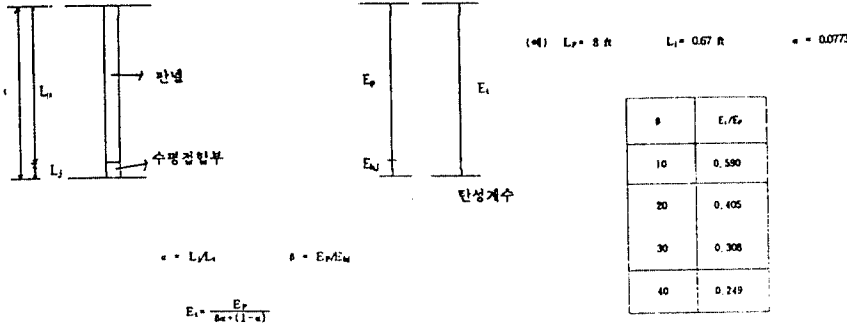


그림.12 수평접합부의 탄성계수와 벽체 동가탄성계수와의 관계

표.3 지하 가상층의 높이에 따른 평 및 회전강성과 실험치

	EV			NS		
	H (ft)	KLAT (Kips/ft)	KROT (Kips ft/rod)	H (ft)	KLAT (Kips/ft)	KROT (Kips ft/rod)
EXPERIMENT		8.7×10^4	3.7×10^4		11.5×10^4	1.8×10^4
ANALYTICAL MODEL	3	16.6×10^4	2.2×10^4	3	12.5×10^4	1.27×10^4
	6	8.3×10^4	1.34×10^4	6	5.88×10^4	8.48×10^3
	10	4.76×10^4	9.4×10^3	10	3.57×10^4	5.86×10^3
	20	2.27×10^4	5.4×10^3	20	1.75×10^4	3.39×10^3
	30	1.4×10^4	3.88×10^3	30	1.15×10^4	2.3×10^3

표.4 지반조건에 따른 벽석결과와 실험결과와의 비교

$E_p=576000\text{KSF}$ $E_c=34000\text{KSF}$ (단위 : 초)

모드	$N_0=0$ E_c/E_p	$N_0=20\text{ft}$ $E_c/E_p, E_p/E_c$	$N_0=20\text{ft}$ $E_c/E_p, E_p/E_c$	EXPERIMENT	
				강제진동	무변진동
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

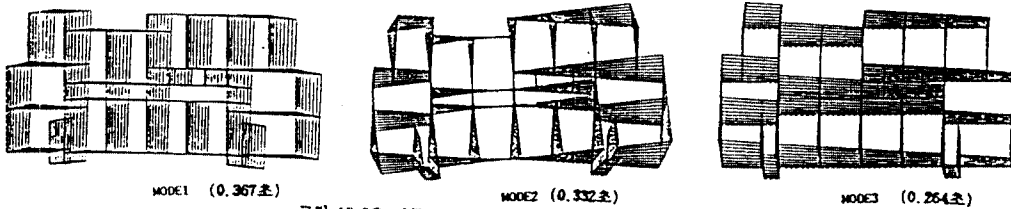


그림.13 8층 실물 P.C.아파트의 고유주기와 고유모드(ETABS)

표.5 재료의 기본유연성

Type of Joint	Joint diagram	Grade of mortar or concrete in contact of precast elements		
		up to 1 MPa	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}

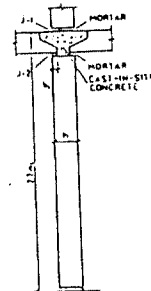


그림.14 동가탄성계수 계산을 위한 한 벽체 예