

우리나라에서의 PC 구조물의 내진 성능 실험

정 린* 김 우**
정 하 선*** 이 한 선****

1. 머릿말

우리나라의 주택부족 현상은 1970년대 중반부터 계속되고 있는 주택난 해소를 위한 정부의 적극적인 노력에도 불구하고 날로 심화되고 있는 실정이다. 이는 도시인구의 증가와 핵가족의 가속화로 인해 급증하는 수요를 충족할 수 없고, 동시에 숙련 건설 노동인력의 부족으로 노임이 급등하여 생산원가와 상승하므로써 건설회사의 주택 물량 공급에 한계가 있기 때문이다. 향후 이러한 현상은 더욱 심화될 전망이다. 따라서 대부분의 주택생산 업체들은 재래식 현장 타설 공법에 비해 인력 수요가 적은 공업화 공법으로 P.C (PRECAST CONCRETE) 공법의 적용을 서두르고 있는 실정이다.

그러나 현재 국내에서 사용하고 있는 몇 개의 P.C공법은 외국 기술을 도입한 것을 약간씩 변경시켜서 적용하고 있는 실정이다. 이제 우리도 우리나라의 P.C 구조물 System을 개발하고 특히 P.C 고층 아파트 구조 설계기준이 마련되어야할 시점에 와 있다고 하여야 할 것이다. 우리의 독자적인 PC 구조물에 대한 실험과 설계기준의 제정은 도입된 외국 공법이 국내의 현실적 조건인 지진의 크기정도, 제품의 질, 조립공의 Workmanship등이 충분히 고려되어 있는지를 검토할 수 있는 판단의 기준이

될뿐 아니라, 체계적인 내진설계 지침을 제시함으로써 궁극적으로 우리의 여건에 부합되는 경제적이고 안전한 우리 고유의 독자적인 기술을 개발 하려는데 큰 도움이 될 것이다.

이 글에서는 현재 관심이 집중하고 있는 P.C 공법에 대하여 국책과제(책임자 정하선 박사, 세무 책임자 이한선 박사)로써 대한주택공사 부설 주택 연구소의 구조 연구실에서 수행하고 있는 국내의 여러 공법에 대한 P.C 구조 내진 성능 실험에 대하여 개략적으로 소개하고자 한다.

2. 국내의 기존공법에 대한 내진 성능 실험

2.1 일반

최근 국내에는 PRECAST CONCRETE 대형 판넬 아파트 건물이 대량으로 건설되고 있다. 향후 이러한 추세는 더욱 현저해질 전망이다. 그림1에서 보이는 것처럼 이러한 구조물은 주로 1방향 슬래브가 내력벽 (LOAD BEARING CROSS WALL)에 의해 지지되어 있다. 이러한 구조의 내진 거동을 이해하기 위하여 이 구조 System은 3개의 기본 구조요소(BASIC STRUCTURAL ELEMENT)로 이루어 졌다고 이상화 시킬 수 있다(그림1).

첫째는 주로 횡하중에 대한 내력벽으로써 단지 수평 연결만으로 된 단순 내력벽(Simple Wall)형식이다. 둘째는 수평 연결 뿐만 아니라 수직 연결까지 되어있는 형태로, 단순 내력벽이 서로 연결되어져

* 정회원, 단국대 부교수
** 정회원, 전남대 조교수
*** 정회원, 주택연구소 책임 연구원
**** 정회원, 주택연구소 선임 연구원

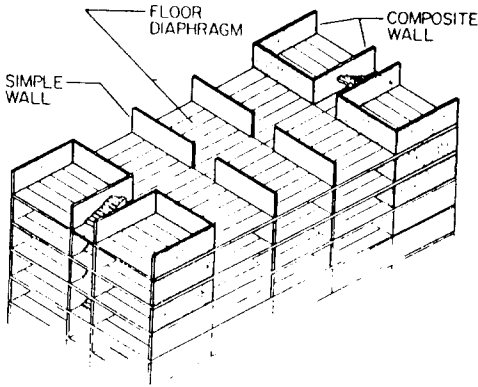


그림1. Basic structural elements of large panel precast concrete buildings

서 수직 하중과 횡하중을 지지하는 합성내력벽 (Composite Wall)형식이며 마지막으로 여러 벽체에 의해 연결 되어져 있으며 수평 다이아프램(Horizontal Diaphragm)역할을 하는 Slab형식이다.

이러한 구조 System은 연결부에서, 일반적으로 이해하기 어려운 현상들이 많이 발생한다. 특히 주요 횡하중에 저항하는 부재로써의, 벽체의 연결 거동에 대한 현상 파악은 내진 설계의 가장 중요한 핵심일 것이다. 따라서 벽체에 연결하는 형식은 그림2와 같이 구분할 수가 있다. 보통 정상적인 시공 방법하에서는 건조 수축등의 영향때문에, 수평 및 수직 Joint는 균열면으로 간주하는 것이 합리적 일 것이다. 따라서 이 균열면에 작용하는 횡하중에 의한 전단력과 모멘트 및 축 압축력의 조합 상태와 조인트 연결방법(그림3)등의 차이에 의해 그림4와 같이 두가지 현상으로 구분할 수가 있다. 지금까지 위와 같은 현상에 대하여 명확한 이해는 거의 전무 상태이며, 이와같은 현상은 해석적 방법을 통하여는 불가능한 것이다. 따라서 이러한 현상을 파악하기 위해 여러 형태의 하중이 각기 다른 형태로 동시에 작용하는 경우를 가정하여 그림2(b)와 같은 벽체 및 Slab Precast 구조물의 full-scale 실험체(Prototype) 와 1/3 Model-Scale 실험체(Model)를 대상으로 국내 3개사 제품에 대하여 각각 실험하였다.

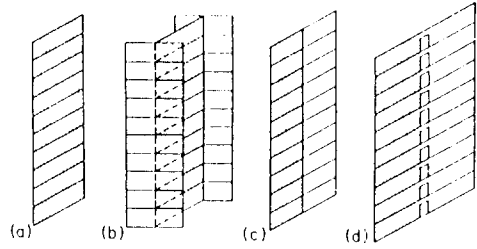


그림2. Typical precast wall configurations(shading denotes a simple wall)

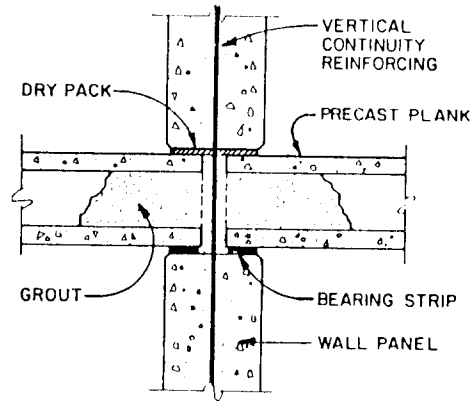


그림3. Typical platform connection

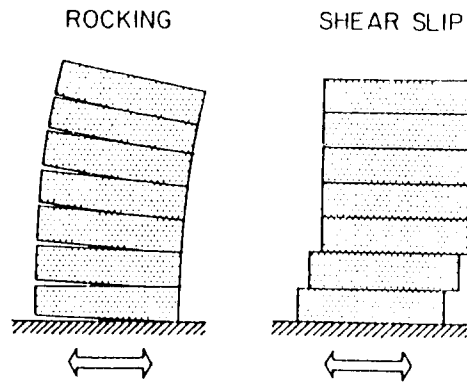


그림4. Rocking and shear slip mechanisms

2. 2 실험

2.2.1 실험의 목적 및 연구방법

본 실험은 국내 내진설계기준에 의한 지진하중에 대하여 안정성 및 경제성있는 P.C 구조물의 내진설계 지침을 제시하고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 다음과 같은 방법으로 연구의 방향을 설정

하였다.

- 가. Pseudo-Static 실험에 대한 실물크기 P.C 구조물의 Subassembly의 구조 특성 확인
- 나. 실물크기의 P.C 구조물과 축소모델의 구조거동 유사성 확보
- 다. Shaking table을 이용하여 실제 지진운동과 유사한 지진파를 축소모델 P.C 건축물의 기초에 작용시켜 구조물의 안전성을 관찰함.

2.2.2 실험 계획

사진1은 실험중인 시험체의 Test set-up을 보여주고 있으며 표1은 이미 수행되었거나 준비중인 본 실험의 개요를 나타내었다. Shaking Table 실험에 있어서는 full-scale 실험이 불가능하므로 1/3 축소 모델 실험을 준비하고 있으며 1/3 축소 모델 실험에 대한 신뢰성을 확보하고자 Pseudo-Static 실험에서는 실물 및 1/3 축소 모델을 상사법칙에 의거 설계, 실험하고 그 실험결과를 비교 검토함으로써 추후 수행될 Sh-aking Table 모델 실험의 결과를 가지고 full-scale 실험체의 성능을 평가하고자 하는 것이다. 지금까지 국내 3개사 제품 실물 5개와 모델 5개를 실험 완료 하였으며 11월에는 대덕 해사기술연구소 국내 최초로 설치되는 Sh-aking Table(4m×4m)을 이용하여 Taft 지진 기록(1952년)을 입력시켜 실험체의 거동을 연구할 계획이다. 그림5는 Pseudo-Static 실험의 Test Set-

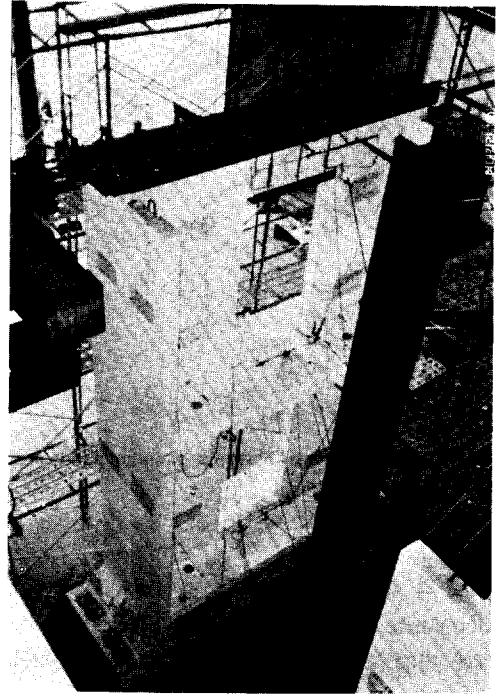


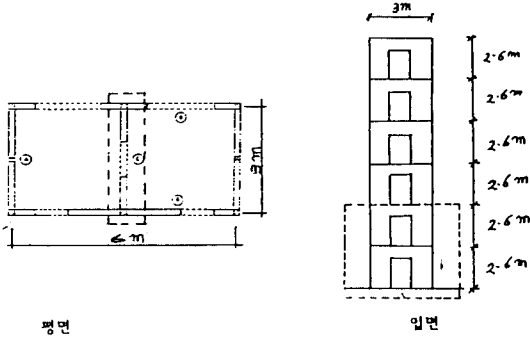
사진1. 시험체 Test Set-up (Prototype)

Up과 Sensor의 위치등을 보여주고 있다.

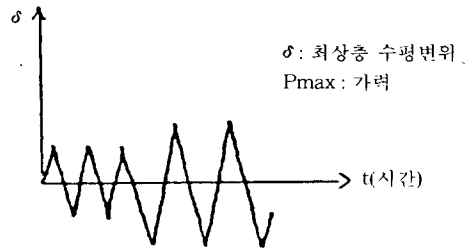
대덕의 해사 기술 연구소의 구조 실험실은 국내 최고의 수준으로, 설치중에 있는 진동대(Shaking Table)가 9월말 완료되면 세계에서 몇 번째로 손 꼽을 수 있는 우수한 장비를 갖춘 완벽한 실험실이 될 것이다.본 실험에 대한 독자들의 이해를 돕기

표1. 실험 계획

실험의 종류	실험의 목적	시험체 종류	시험체 수
i) 재료실험	<ul style="list-style-type: none"> • 상사성 비교 • 재료의 역학적특성 규명 	보강철근 및 콘크리트 공시체	
ii) Pseudo-Static 실험	<ul style="list-style-type: none"> - 실물 구조물의 구조거동 - 실물과 모델의 상사성 검토 	실물 및 1/3 축소모델 각각 3개	(각3) A사 2개 시스템(고·저층): 6 B사 1개 시스템(고 층): 3 C사 1개 시스템(고 층): 3
iii) Shaking Table 실험	<ul style="list-style-type: none"> - 우리나라의 예상지진에 대한 구조거동 - 극심한 지진시의 파괴거동 - 구조해석과 실험결과 비교 	1/3축소 P.C 건물	A사 2개 시스템(고·저층) B사 1개 시스템(고 층) C사 1개 시스템(고 층)
iv) Pseudo-Dynamic 실험	- 고가의 Shaking Table을 쓰지 않고, 간단한 실험장비로 실제 지진에 대한 구조물의 거동을 연구	1/3 축소 P.C 건물	A사 2개 시스템(고·저층) B사 1개 시스템(고 층) C사 1개 시스템(고 층)



나) Cyclic 증가



나. 시험체 Isometric

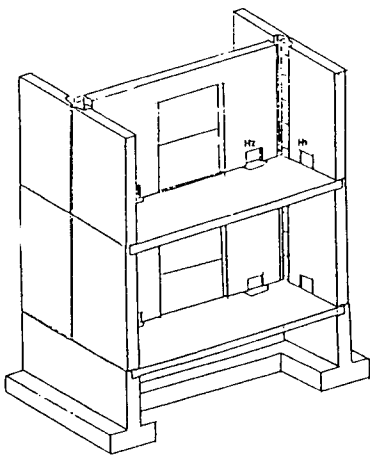
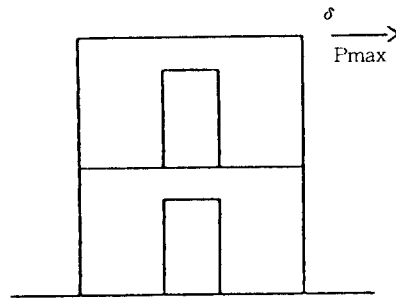


그림6. 시험체 개요



(제2조 시험체)

나. 주요실험 Out put

- 1) 종국강동(P max)
- 2) 중요부위의 변형(접합부 Slip 및 opening gap, 판넬의 전단변형)
- 3) 중요부위의 파괴형상(철근의 항복 및 좌굴, 콘크리트 균열 및 부숴짐)

다. 사용실험기기

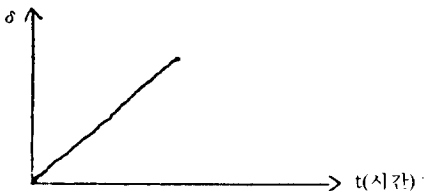
- 1) 사용실험기기
 - 가) 50ton Actuator 1대
 - 나) LVDT(변위 측정기) 19EA
 - 다) Dial gage(미소변위 측정기) 6EA
 - 라) Strain gage 12EA

2.2.4 실험 방법

본 실험의 구체적인 실험방법을 요약하면 다음과 같다.

가. 가력 방식

- 1) 변위제어 방식
- 2) 중력 하중의 영향 무시
- 3) 적용변위 이력 종류
 - 가) 단순증가



(제1조 시험체)

2.3 실험의 결과

현재까지는 제1단계 실험인 Pseudo-Static 실험만이 완료된 상태이며 이에 대한 분석은 진행중에 있다. 지금까지 얻은 몇가지 실험자료는 대략 다음과 같다.

가. 하중-변위곡선

하중점에 작용하는 힘과 하중점의 변위의 관계를 나타낸다.

- 유압장비 : 2 Sets(256 1/min./set)
- 하중제어장비 : 11 Sets(변위 및 하중계측부와 하중/변위 제어부로 구성)
- 자료 취득 장비 :
 - 응력측정 : 정적 300 Chs, 동적 64 Chs
 - 변위측정 : 20 Chs, (측정범위 : 10mm ~ 250mm)
- 자동제어 및 자료분석 장비 :
 - Computer : DEC LSI 11/23
 - Memory : 160 kbytes
 - A/D 변환기 : 96 Chs
 - D/A 변환기 : 9 Chs
 - DIO : 16 Chs
 - Computer : IBM PC - AT
 - Memory : 640 kbytes
 - A/D 변환기 : 16 Chs
 - D/A 변환기 : 4 Chs
 - DIO : 16 Chs

6자유도 내진시험 설비

(1) 설비제원

- 진동대 크기 : 4.0m × 4.0m
- 최대 시험체 중량 : 30 ton
- 1축 가진성능(최대시험체 기준) :

방향	종(X)	횡(Y)	연직(Z)
최대 성능			
변위(mm)	+100	+100	+67
속도(mm/sec)	+750	+750	+500
가속도(g)	+1.5	+1.5	+1.0

- 가진 진동수 : 0 ~ 50 Hz
- 가진 자유도 : 제어가능 : 6자유도
프로그램가능 : 3자유도(X, Y, Z)
- 아날로그제어 : 3변수(변위, 속도 및 가속도), 자유도 제어
- * X, Y, Z 방향의 시간축 신호를 simulation할 경우, 나머지 3회전자유도(Yaw, Pitch, Roll) 제어가능
- * 각 자유도는 3개의 변수 형태로 simulation 정도에 따라 동시 제어가능

(2) 시험과형

- 주기과형 :
 - SINE 과형
 - 선형변화 주파수의 SINE 과형
 - 지수변화 주파수의 SINE 과형
- Even-tabulated 및 Paired 함수 : 각 점에서 정의되는 임의형태의 시간이력함수
- 랜덤신호(Data Base System 사용) :
 - Fourier 역변환에서 의해 생성되는 일반적인 랜덤신호 (Spectrum 밀도함수 또는 충격 Spectrum 함수로부터의)
 - 지진과형의 랜덤신호

사진2는 해사기술연구소에 설치된 Shaking Table 과 동형의 Shaking Table 위에 RC구조물을 올려놓고 인공 매스(artificial mass)를 설치하고 있는 모습이다.

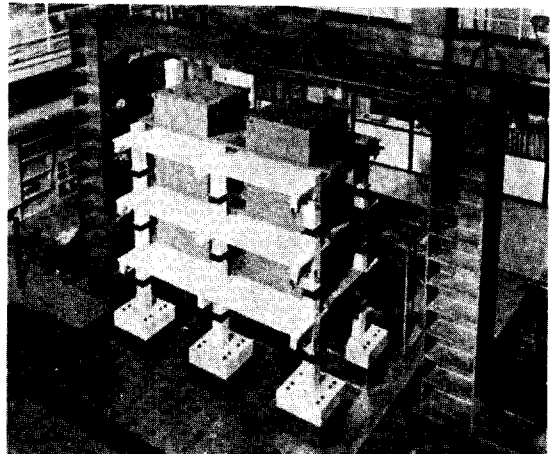


사진2. 4m × 4m shaking table 위에 놓인 실험체

2.3.3 시험체 개요

본 실험에서 사용될 시험체의 개요는 다음 그림 6과 같다.

가. Pseudo-Static 실험용 Subassemblage의 위치

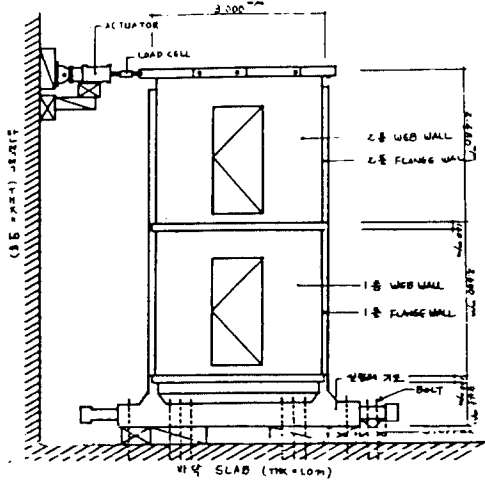


그림5(a) 실험체 setup (prototype)

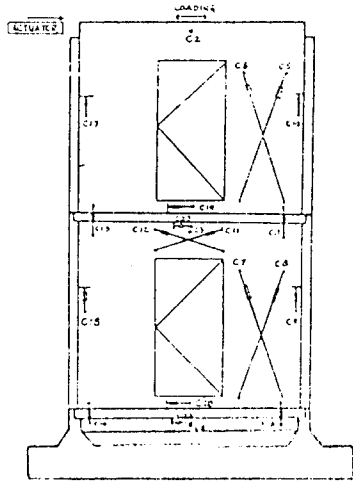


그림5(b) 실험체의 sensor의 위치(좌측)

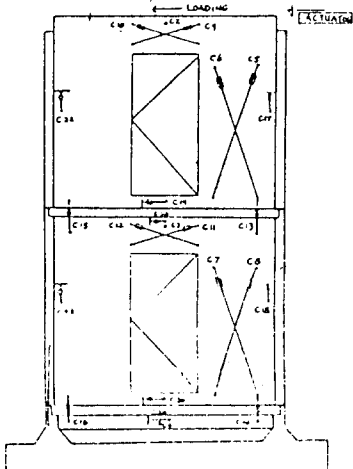


그림5(c) 실험체의 sensor의 위치(우측)

위하여 해사 기술연구소의 구조실험실이 보유하고 있는 주요한 구조 실험 장비를 소개하면 대략 다음과 같다.

시험설비 및 장비 개요

대구조물 시험설비

- 국제적 규모의 대형 다목적 구조시험설비
- 철근-콘크리트구조(Post-tensioning 공법)
- 임의형상의 복잡, 대형 구조물 실험 가능
- 각종 보조장치, 부대시설 및 장비 보유

(1) 시험설비

- 칫수
 - 시험대 : 25m(길이)×12cm(폭)×1m(두께)
 - 반력벽 : 25m(길이)× 8m(높이)×1m(두께)
 - Anchor Sleeve* 간격 : 0.5m

*) 시험대 및 반력벽에 모형 또는 하중장비 고착용

- 내하하중(설계하중)
 - 집중하중 : 100ton/Point
 - 분포하중 : 1,000ton
- 부대시설 및 장비
 - Pump 실
 - 계측제어실
 - 유압분배장비
 - Hydro-tower(고가 사다리)
 - Hydro-wrench(유압작동 bolting machine)
 - 대형 Frame : 5 Sets
 - 기타 보조 Frame : 다수

(2) 시험장비

해사기술연구소가 보유하고 있는 구조시험장비는 모든 실험이 Computer에 의해 자동제어 되는 미국 MTS사의 Multi-channel Structural Testing System으로써 그 개략적인 시스템 구성도 및 내역은 다음과 같다.

- 하중장치 : 11 Sets(총 340ton 용량)··Actuator

종류	최 대 상 능			보유 수량 (Ch.)	비 고
	정하중(ton*)	변위(mm)	속도(mm/sec)		
1	+/-100	150	40	2	
2	+/-50	150	24	1	
3	+/-25	150	50	2	
4	+/-10	150	122	2	
5	+/-5	150	247	2	
6	+/-5	200	750	2	High Performance

* 최대정하중은 정하중의 약 90%.

나. 주요 부위의 변형

각 부위에 설치된 LVDT와 Strain Gage에서의 나온

- * 수평 접합부의 Slip
- * 수평 접합부의 Opening gap
- * 수직 접합부의 Slip

다. 주요 부위의 파괴현상

- * 수평 접합부 (사진4)
- * 수직 접합부 (사진 5)
- * 판넬의 파괴 (사진 6)

라. 설계 강도와와의 비교

- * 설계 강도
- * 시험 결과 Pmax

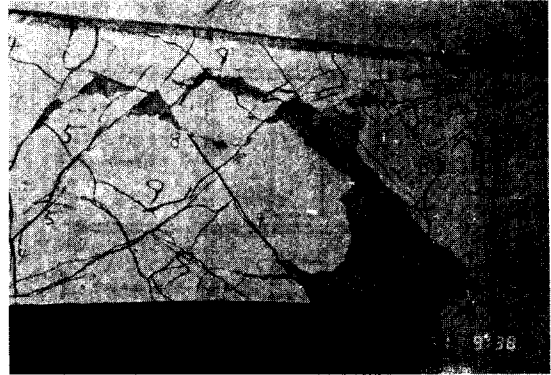


사진6. large panel의 파괴형상

3. 상사성의 확보

어떠한 물리적 현상을 구명하는데 있어서 이론적 고찰과 함께 실험적 방법을 많이 사용하는데 공간적, 경제적 여건으로 인하여 실물(Prototype)실험은 제한되는 경우가 많다. 동적 실험은 이러한 제한이 겹쳐서 실제로는 모형(Model)실험을 거의 수행한다. 이러한 때에는 모형 실험을 통하여 얻은 결과를 이용하여 원형의 현상을 규명 해야할 필요성이 있다.

상사 법칙은 이러한 모형실험(Model test)의 결과를 이용하여 최소한의 오차범위 내에서 유용하게 쓰인다. 이 상사 법칙은 차원해석(Dimensional analysis)을 바탕으로 하여 실험에서 얻고자하는 물리적 수치를 자연의 기본 단위인 길이(L), 무게(M), 시간(T)의 조합으로 이루는데 여기에는 (1) True-Model (2)Adequate Model (3)Distorted Model 등의 몇가지가 있다.

예를들면 원형 실험과 모형 실험에 사용된 재료의 항복 변형도는 같으나 항복강도가 서로 다른것 (그림 5-a)

항복 변형도는 다르나 항복강도는 같은것(그림5-b)

항복 변형도와 항복강도가 다른것 (그림 5-c)

항복 변형도와 항복강도가 같은것 (그림 5-d)

등의 조합이 있을 수 있는 것이다.

여기에 변형율 속도(Strain rate)에 의한 동적효과 (Dynamic effects)가 결합되면 그 결과의 예측은 결코 쉽지 않게된다.

본 실험에서 1/3 scale로 축소된 PC 모델에 사용

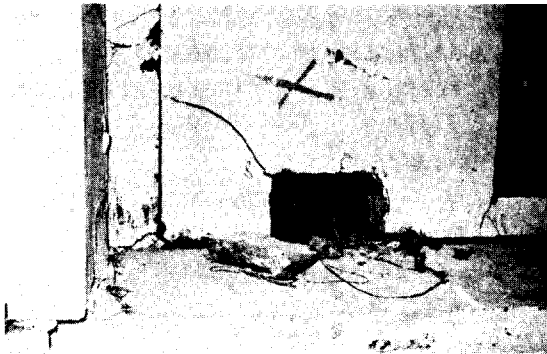


사진4. 수평 접합부의 파괴 형상

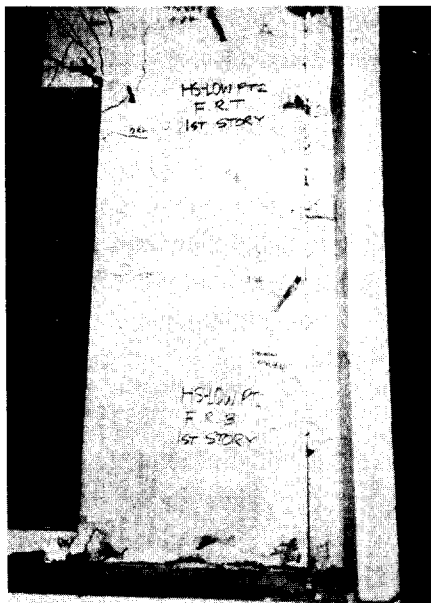


사진5. 수직접합부의 파괴 형상

된 콘크리트는 역시 1/3로 축소된 골재를 사용하여 이루어진 Microconcrete였으며, 철근 또한 축소하여 Prototype의 D19 철근은 D6철근으로, D10이나 D13 철근은 원형철선을 사진7과 같은 특수 제작한 틀을 이용하여 표면을 이형철근과 같은 모양으로 처리 하였다.

Prototype과 Model에 사용된 콘크리트와 철근에 대한 응력도-변형도 곡선은 추후 실험결과를 상사 법칙에 의거 분석하는데 사용될 것이다.

4. 맺는말

본 실험은 지금까지 우리나라에서 수행 되어온 기존, 건축 토목관계 실험의 수준을 한차원 높히는

데 크게 기여하리라 생각된다. hydraulic Jack을 이용한 1 방향 실험과는 비교할 수 없을 정도로 자동화, 기계화를 이루었으며, 실험에 사용된 Actuator 는 미국의 MTS사 제품으로 빠른속도 (2Hz 에서 최대 $\pm 7.5\text{cm}$ Stroke)로 움직이는 반복 주기 하중을 컴퓨터가 제어하고 Data를 자동적으로 컴퓨터에 기록하므로 구조물의 동적 특성까지를 규명하는데 필수적인 장비이다.

또한 Shaking table은 실제로 발생하는 지진파를 그대로 입력시켜 구조물에 대한 내진 성능을 완벽하게 측정할 수 있다. 특히 구조설계자들 사이에도 논란이 되고있는 우리나라 내진규준의 R factor (반응 수정 계수)를 정하는데 매우 유효한 역할을 하리라 기대된다.