수평접합부의 비탄성 특성을 고려한 프리캐스트 대형판넬 구조물의 비선형 해석에 관한 연구

Nonlinear Analysis of Precast Large Panel Structures Considering the Inelastic Properties of Horizontal Joints

정 일영* 최 완철** 송 진규*** 강 해관****
Chung, Il-Young Choi, Oan-Chul Song, Jin-Gyu Gang, Hae-Guan

ABSTRACT

The stability and integrity of precast large panel structures are analyzed with nonlinear mathematical model considering the inelastic properties of horizontal joints. In this research, an analysis for cyclic loading test was carried out by the macro model that idealized the horizontal joints as inelastic-nonlinear spring systems.

As a results, the strain hardening ratio of shear slip element was estimated as about 0.05%~ 0.2% of initial shear stiffness. And under lateral load, the rocking motion due ti overturning moment was dominant rather than shear slip motion in the behavior of precast structures.

1. 서론

프리캐스트 L.P.구조는 공장제작된 내력벽판을 현장에서 조립하는 SYSTEM으로, 1960년대 국내에 최초로 도입되었으며 수직,수평의 접합부에서 발생하는 취역면으로 인해 일체식과는 다른 거동특성을 나타낸다. 수직접합부의 주요 거동특성은 전단에 의한 미끄러짐이며 따라서 이를 최소화할수 있는 충분한 내력의 확보를 통해 일체성을 유지하도록 해야한다. 반면에, 수평접합부의 경우는 전단미끄러짐에 비해 전도모멘트로 인한 개폐운동이 전체 구조물의 파괴거동을 지배하게 되므로 휨강도의 발휘를 통한 안정성 유지뿐만 아니라 휨변형에 대해서도 충분한 연성능력을 발휘해야 한다. 본 연구에서는 프리캐스트 대형판 구조물이 지진동을 받을 때의 내진특성을 고찰하기에 앞서, 탄소성 스프링을 이용한 거시적 모델에 의하여 기존의 반복재하 실험에 대한 비선형 해석을 수행함으로써 동적해석에 필요한 수치자료들을 얻어내는데 그 주안점을 두었다.

2. 판넬의 모델링

내력 판넬의 수치 모델링 방법은 강체나 변형보, 유한요소등을 사용한 여러가지 방법이 있으나 본 연구에서는 접합부의 점진적인 벌어짐 및 접합부 스프링과의 적합성등을 고려하기 위하여 4절점 유한요소로 판넬을 모델링 하였다.

* 서울대학교 건축학과 교수
** 숭실대학교 건축공학과 부교수
*** 서울대학교 건축학과 박사과정 수료
**** 서울대학교 건축학과 박사과정

3. 수평접합부의 모델링

수평접합부를 모델링하기 위하여 접합부의 거동에 영향을 미치는 여러 인자들(벌어짐 ,압괴, 전단 미끄러짐)을 주요 거동특성에 따라 분리한 후, 이러한 특성들을 나타내는 스프링 요소로 모델링 하였다.

3.1 압축요소(Gap Element)

이 요소는 모르타르의 반복이력 특성을 이상화한 one component 모델로서 압축변형에 대한 강성만 존재하고 벌어짐에 대한 인장성능은 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 하중-변형이력특성은 그림1과 같이 4개의 뼈대곡선으로 이루어져 있으며 이중 선분3(decending branch)의 처리 과정은, 일단 요소강성이 (-)가 되면 0에 가까운 강성을 가정하고 실제강성을 고려하기 위하여 구간의 끝에서 불균등하중을 계산해 다음구간에서 외력으로 작용시키게 된다. 압축요소의 자유도는 그림2와 같이 수직방향만 존재하며 계산된 요소 변형으로부터 다음과 같은 요소강성을 얻어낼 수 있다.

$$\underline{K} = k \cdot \begin{bmatrix} \left(\frac{b_1}{L_1}\right)^2 & \frac{a_1 b_1}{L_1^2} & -\frac{b_1 b_2}{L_1 L_2} & -\frac{a_2 b_1}{L_1 L_2} \\ & \left(\frac{a_1}{L_1}\right)^2 & -\frac{a_1 b_2}{L_1 L_2} & -\frac{a_1 a_2}{L_1 L_2} \\ & & \left(\frac{b_2}{L_2}\right)^2 & \frac{a_2 b_2}{L_2^2} \\ & & & \left(\frac{b_2}{L_2}\right)^2 \end{bmatrix}$$

3.2 인장요소(Tension Element)

인장요소는 접합부의 전도미케니즘에 있어서 인장저항을 통하여 벌어짐을 억제하는 보강철근의 반복이력 특성을 이상화한 것으로 그림 3과 같은 bi-linear형태의 하중-변형 이력을 갖는 것으로 모델링 하였으며, 초기강성행렬은 압축요소와 동일하다.

3.3 전단요소(Shear Element)

수평접합부의 계면에서 미끄러짐에 대하여 저항하는 전단저항의 주요 미케니즘은 마찰계수와 수직압축력의 곱으로 표현되는 단순마찰과 보강근에 의한 전단마찰 그리고 기타 기계적 마찰등에 의한 것이다. 본 연구에서는 이러한 하중-변형 특성을 설명하기 위하여 그림 4와 같이 단순마찰의 효과만을 고려한 비교적 단순한 형태의 전단요소를 사용하였으며, 이 때, 요소의 마찰강도는 마찰계수 μ와 수직압축력의 곱으로 결정되고 이 두 값은 일정한 상수값을 갖는 것으로 가정하였다. 강성행렬을 유도하기 위한 요소의 절점 및 변형에 대한 자유도는 그림 5와 같으며 이로부터 다음과 같은 요소강성행렬을 얻게 된다.

$$\underline{K} = a^T k a = \frac{k}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4 원점회귀 요소(Orign Oriented Element)

이 요소는 그림 6과 같이 전단요소 또는 철근요소와 병렬로 연결시킴으로써 강성저하 특성을 나타내기 위한 것으로, 집중적인 소성발생이 예측되는 곳에 부분적으로 사용하게 되며 unloading 강성의 저하율은 병렬 스프링의 초기강성비에 따라 결정되도록 하였다.

4. 반복재하 실험에 대한 비선형 해석

해석의 주요 목적은 동적해석에 필요한 변수값들을 얻어내고 정확한 해석에 필요한 기법등을 고찰하며 그밖에 개발한 프로그램의 적합성을 검증하는데 있다. 이를 위하여 유고슬라비아 IZIIS와 미국 EERC의 공동연구과제 중에서 수평접합부만 있는 1/3크기의 단순벽체에 대한 반복하중 실험에 대한 수학적 모델을 구성하여 해석하고, 이를 실험결과와 비교하였다.

4.1 실험개요 및 결과

반복재하 실험에 사용된 부재의 상세 및 실험장치는 그림 7과 같으며 이들은 표 1과 같은 부재 성능을 가진다. 횡하중의 가력은 변위조절에 의해 이루어졌고, 그 결과를 요약하면, L.P.62(8.48 ton)에서 초기항복하중에 도달하였고 L.P.149(9.58ton)에서는 판넬의 국부적 손상을 보였으며 L.P.219(9.78ton)에서 최대하중을 나타내면서 기저부 좌측 TIE가 분리되었다. 실험에 대한 분석결과, 구조물의 손상에 영향을 주는 주요 인자는 모멘트 변형에 의한 벌어짐(gap)이며, 전단 미끄러짐에 의한 영향은 무시할 수 있을 정도였다.

4.2 주요변수 및 해석모델

접합부 스프링의 압축특성 및 인장특성은 비교적 정의하기가 용이한 반면에 소성이후에 발생하는 전단 소성경화비의 경우는 그 값을 얻어내기가 매우 어려운 것으로 판단되어 해석시 이를 주요변수로 채택하였다.

RUN1(R1-SH1) : K_h/K_e = 0.01335
RUN2(R1-SH1) : K_h/K_e = 0.00267
RUN3(R1-SH1) : K_h/K_e = 0.00053

해석모델은 그림 9와 같으며, 접합부에 사용된 스프링의 배치는 압축요소 16개(각 단부 8개), 전단요소 4개, 철근요소 6개(각 단부3개)를 부담면적에 따라 분산배치하였다. 또한, 수직하중은 총 12.7ton을 상부층의 5절점에 나누어 분배하였으며, 횡력은 실제로 실험에서 적용한 하중프로그램과 동일한 효과를 가지도록 프로그램상에서 변위조절에 의하여 총 32회의 변위분기점이 발생할 때까지 해석을 수행하였다. 해석결과와 실험결과는 L.P.62, 99, 149, 219에서 나타난 최상부 변위와 기저부 미끄러짐, 기저부 벌어짐에 대하여 고찰하였다.

4.3 변형경화비의 변화에 따른 해석결과

- RUN1 : R1-SH1

해석결과, 부재 횡하중의 경우 초기항복하중이 커서(10.4ton) 실험치(8.4ton)와는 상당한 차이를 나타내었다. 그러나 기저부 상대 미끄러짐과 벌어짐은 탄성범위(L.P.62)에서는 실험결과와 유사한 값을 보여 초기 강성에 대한 가정이 타당한 것으로 판단되었다. 소성 이후에 미끄러짐변화율은 매우 작으며, 그 이유는 변형경화비가 커서 전단요소의 강성이 실제보다 강(stiff)하게 평가되었기 때문인 것으로 생각된다. 이로 인해 벌어짐이 점차 증가하여 L.P.219에서 1.25mm(실험: 7.4mm)를 나타내었다. 본 해석에서 적용한 변형경화비에 대한 가정은 타당티 않은 것으로 판단되어, 그 값을 1/5로 낮추고 2차해석을 수행하였다.

- RUN2 : R1-SH2

2차 해석 결과(표 2), 변형경화비를 낮춤으로써 R1-SH1에 비해 횡저항 하중수준과 벌어짐량이 개선되었다. 그러나 횡하중의 경우 초기 항복값은 실험치와 거의 일치하지만, 소성 이후에는 여전히 큰 값을 보이고 있고, 이 값이 실험치에 근접하기 위해서는 해석시 마찰계수의 저하효과등을 고려해야 할 것으로 판단된다. 하중 이력에 따른 전단 미끄러짐의 변화량은 실험에서 나타난 변형의 증가량에 상당히 근접하였으나 초기 미끄러짐량이 커서 전체적으로 실험치보다 다소 큰 값을 보이고 있다. 본 해석에서는 base plate를 강체로 가정하였고, 지반에 완전히 고정된 것으로 보았으나, 만약 base plate와 지반간의 상대 변형을 고려한다면, 이러한 상대 미끄러짐량은 다소 줄어들 것이다. 해석을 통해 얻어낸 하중-변형 이력(그림 10~12)을 보면, 하중 및 변위량들은 주어진 가정하에서, 전체 변위 이력에 대하여 합리적인 값들을 나타내는 것으로 판단되어지며, 따라서 매크로 모델을 통하여 프리캐스트 수평접합부의 거동을 근사적으로 시뮬레이션하는 것이 가능한 것으로 확인되었다.

3차 해석에서는 변형경화비를 더욱 낮추어(2차 해석의 1/5), 변형경화비의 적정한 범위와 전체 결과에 미치는 효과를 고찰하였다.

- RUN3 : R1-SH3

해석 결과 초기 소성 하중은 실험치보다 오히려 작은 값을 보이고 있으나, 하중 이력이 증가하면서 그 효과는 2차 해석에 비해 별로 개선되지 않는 것으로 나타났다. 또한 변형경화비의 감소로 인해 전단 미끄러짐량은 증가하나, 이로 인해 벌어짐은 오히려 실험치보다 다소 작게 발생하였다. 결과적으로 벌어짐량은 2차 해석에 비해 실험치에 더욱 근접한 값을 보였으며, 변형경화비를 이 값보다 더 낮추는 것은 큰 의미가 없는 것으로 판단되었다.

4.4 압축강성에 대한 고찰

프리캐스트 판넬 구조물에 수직하중만 작용할 경우에는 수평접합부 전단면에 비교적 균등한 하중분배가 이루어지게 되나, 전도모멘트로 인하여 rocking 거동이 발생할 경우에는 전체접합면에 균등한 수직응력이 작용하지 못하게 되어 탄성범위에서도 접합부의 강성이 현저하게 떨어지게 된다. 이러한 현상을 정량적으로 고찰하기 위하여 해석모델 R1- SH2에 단조하중을 가한 후, 작용하중에 대하여 1층 판넬과 기저부 접합부에서의 평균 strain을 구하였으며(그림 13), 그 결과 탄성범위에서의 접합부 압축강성은 판넬강성의 약46% 정도를 발휘하는 것으로 나타났다.

5. 결론

1) 본 논문에서 사용한 접합부 모델을 통하여 프리캐스트 구조물의 하중-변형 이력을 합리적으로 시뮬레이션 하는 것이 가능하다.
2) 해석에 있어서 접합부의 전단변형에 대한 변형경화비는 그 값을 정확히 정의하기 어려우며 본 해석을 통하여 나타난 적정 범위는 초기 전단강성의 0.05 % ~ 0.2 % 범위인 것으로 나타났다.
3) 횡력을 받을 경우 전체 하중 이력에 대한 접합부 미끄러짐량은 매우 미세하며, 구조물 전체의 거동을 지배하는 것은 수직 방향의 벌어짐인 것으로 나타났다(실험[L.P.219] : 접합부 길이의 14%, 해석[L.P.219] : 접합부 길이의 17%~20%)
4) 횡력이 작용할 때의 수평접합부의 압축강성은 rocking 거동으로 인해, 탄성범위에서 판넬강성의 46% 정도로 감소되는 것으로 나타났다.
5) 횡방향 저항하중은 해석치가 실험치에 비하여 다소 높으며, 이것은 반복 이력에 따른 마찰계수의 감소효과를 고려하지 못했고, 가정한 값들이 엄밀하지 못한 결과인 것으로 판단되며, 정확한 해석을 위해서는 보다 정밀한 요소의 개발이 필요할 것이다.

6. 참고 문헌

1. 건설부, "프리캐스트 콘크리트 조립식 구조설계기준 및 해설," 1992.
2. 강해관, "수평접합부의 비탄성 · 비선형 특성을 고려한 프리캐스트 대형판 구조물의 해석에 관한 연구," 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문, 1995
3. Donald M.Schultz,L.s. Jodal,Arnaldo T.Derecho and M.Iqbal, "PCA Report No.5 : Special Topics," Design and Construction of Large Panel Concrete Structures,Depatment of Housing and Urban Development, Washington, D.C., Jan. 1979.
4. Vahid Schricker, Graham H. Powell, "Inelastic Seismic Analysis of Large Panel Buildings," Report No. EERC 80-38, University of California, Sept. 1980.
5. Mattock, A. H., "Effect of reinforcing Bar Size on Shear Transfer Across a Crack in Concrete," Report SM77-2, Department of Civil Engineering, University of Washington, Sept. 1977
6. Amin E.Kanaan, Graham H.Powell, "General Purpose Computer Program for Inelastic Dynamic Response of Plane Structures," EERC 73-6, University of California, Berkeley, April 1973
7. M.G.Oliva, R.W.Clough, M.Velkov, P.Gavrilovic, "Correlation of Analytical and Experimental Responses of Large-Panel Precast Building Systems," UCB/EERC-83/20, University of California, Berkeley, May 1988
8. Malhas, Faris Amin, "Seismic Response of Large Precast Panel Walls: Analytical Correlations with the Shaking Table Tests Results," University of Wisconsin-Madison, 1988
9. Johal,I.s., and N.W. Hanson, "PCA Suplemental Report B : Horizontal Joint Test," Design and Construction of Large Panel Concrete Structures, Department of Housing and Urban Development, Washington, D.C., Nov. 1978.

표 1 반복 재하실험에 사용된 부재 성능

모델	콘크리트 압축강도		수직 인장 보강근		측면 수직 보강근	
	판 넬 (kg/cm^2)	접합부 (kg/cm^2)	단면적 (cm^2)	항복강도 (ton/m^2)	단면적 (cm^2)	항복강도 (ton/m^2)
PZ-1	463.2	307.6	1.13	39,424	1.01	45408

표 2 해석 결과와 실험 결과의 비교(R1 -SH2)

loading point	횡하중 (ton)	변 위 (mm)	실험 결과 변위/ 하중 (mm/ ton)	비 고
L.P. 62	P = 8.5	Dtop= 2.93	3.21/ **8.48**	초기항복 하중
		Drel= 0.46	0.16	
		Dgap= 0.32	0.40	
L.P. 99	P =12.7	Dtop=10.80	11.04/ **9.58**	
		Drel= 1.18	0.57	
		Dgap= 3.52	2.65	
L.P.149	P =12.9	Dtop=16.30	16.59/ **9.65**	판넬국부적 손상
		Drel= 1.23	0.88	
		Dgap= 6.60	5.40	
L.P.219	P =13.8	Dtop=23.50	24.00/**9.78**	최대하중 좌측TIE 철근분리
		Drel= 1.39	1.17	
		Dgap=10.70	7.40	

HARDENING RATIO = 0.0267 , FRICTION COEFF. = 0.7

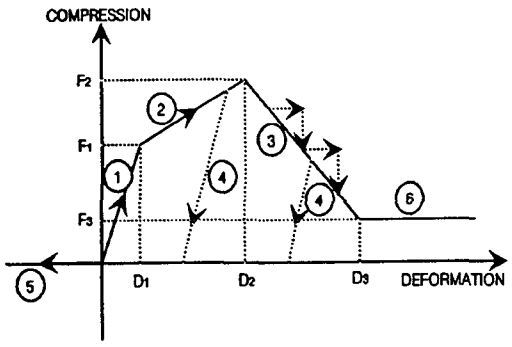


그림 1 압축요소의 envelop 곡선

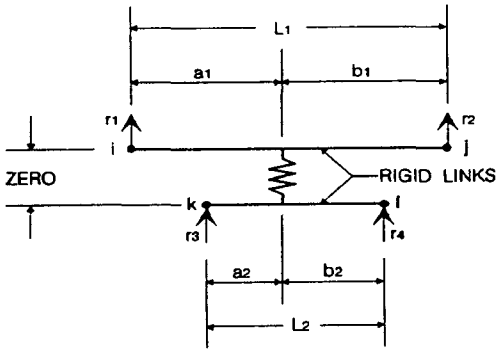


그림 2 압축요소의 자유도(D.O.F.)

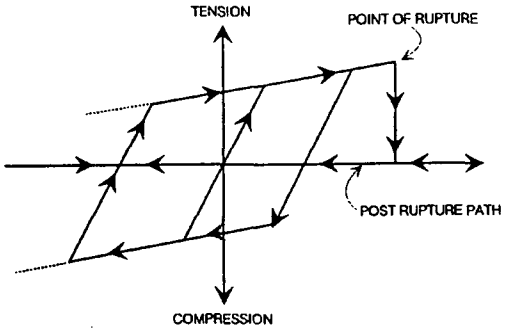


그림 3 인장요소의 하중-변형관계

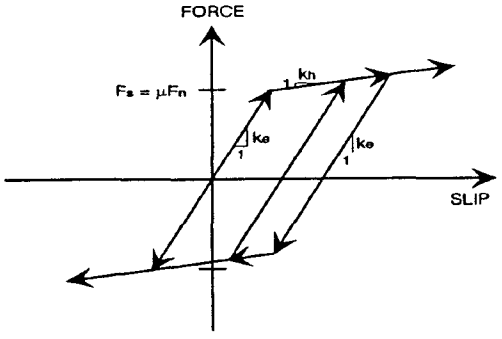


그림 4 전단요소의 하중-변형관계

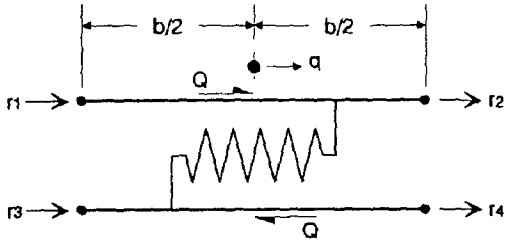


그림 5 전단요소의 자유도(D.O.F.)

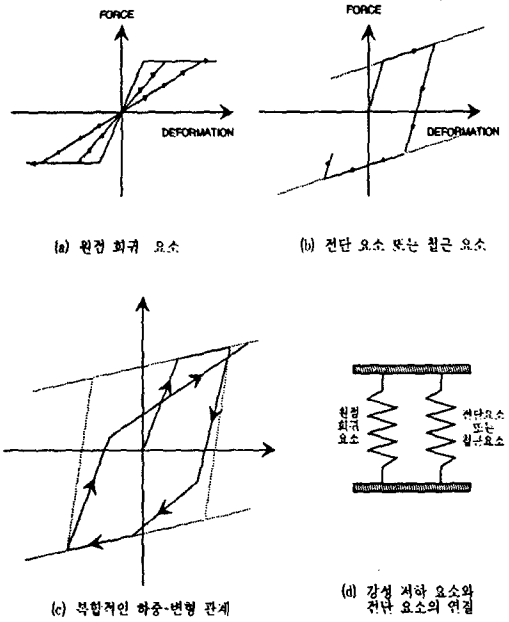
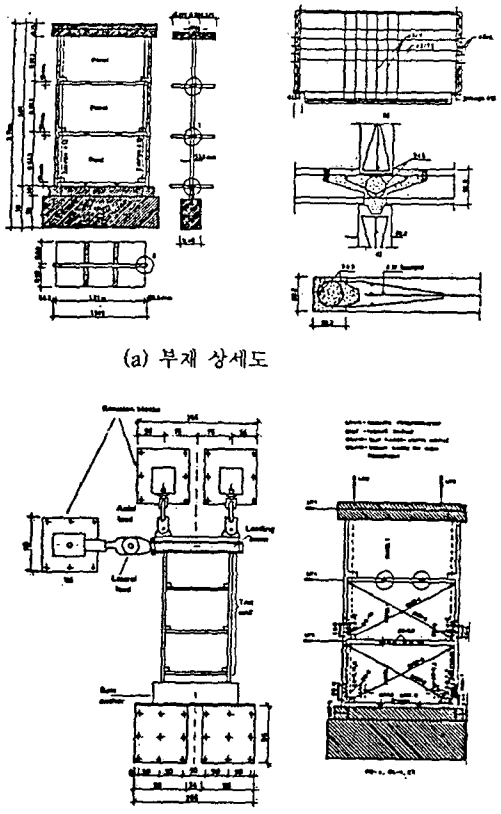


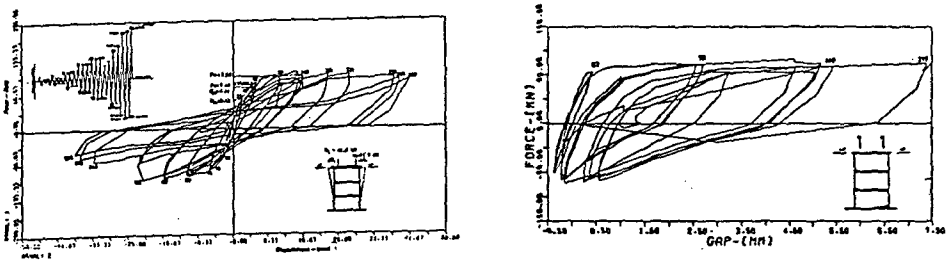
그림 6 원점회귀요소



(a) 부재 상세도

(b) 실험 장치도

그림 7 부재상세도 및 실험장치도



(a) 최상부 변위이력

(b) 기저부 우측단부 벌어짐

그림 8 반복재하 실험 결과

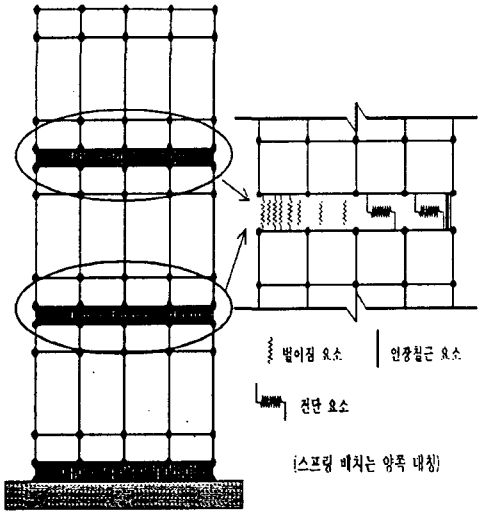


그림 9 해석 모델의 스프링 배치

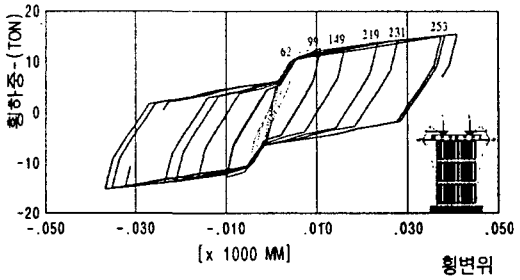


그림 10 상부에서의 횡변위 이력

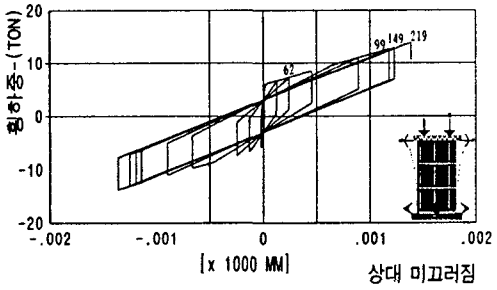


그림 11 기저부 상대 미끄러짐

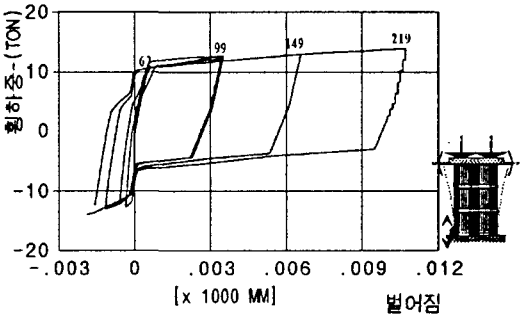


그림 12 기저부에서의 벌어짐 이력

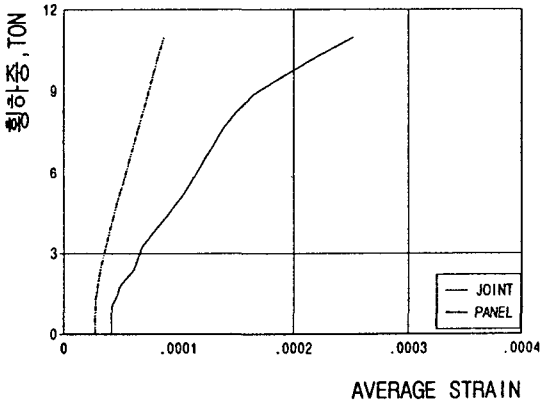


그림 13 1층판넬과 기저부 수평접합부의
하중-변형관계(RUN2: R1-SH2)