

R.C. 구조물의 지진에너지 흡수능력 연구 Seismic Energy Absorption Capacity in R.C. Structures

김창훈*
Kim, Jang Hoon

이리형**
Lee, Li Hyung

ABSTRACT

One way in which a comparison can be made between various reinforced concrete structures is to compare the rate of energy absorption capacity. It is useful to use a well-known standard hysteretic rule as a benchmark for comparisons. The concept of energy absorption efficiency with respect to an elasto-perfectly plastic (EPP) system has been adopted. The normalized cumulative energy, cumulative plastic drift and energy response spectra are used for the method. The previous study using the energy spectra developed by Chang and Mander (1994) indicates the cumulative plastic demand for most earthquakes to be 0.1 rad., but a conservative upper bound of 0.2 rad. could be expected for a maximum credible earthquake. From the present study, the energy absorption efficiency in R.C. structures with respect to the EPP system may range in 30%-45% for most cases.

1. 서론

철근콘크리트 구조물의 내진성능을 평가하는 주요지표로는 “횡하중 전달능력 (Base Shear Capacity)” 및 “소성변형능력 (Plastic Deformation Capacity - Ductility)” 등을 들 수 있다. 그러나 지진의 시간적인 요인 (Duration Effect) 때문에 이들만으로는 구조물의 내진성능을 평가하기에는 충분치 않다. 즉 지진은 구조물에 대하여 일방향 하중 (Monotonic Loading)을 생성하는 것이 아니라, 반복하중 (Cyclic Loading)을 유발한다. Duration Effect 라함은 지진이 작용하는 동안에 발생하는 일련의 반복하중이 구조물에 미치는 영향으로, 단적인 예로는 Low-Cycle Fatigue 를 들 수 있겠다.

또 다른 내진성능 평가지표로는 “지진에너지 흡수능력 (Seismic Energy Absorption Capacity)”이 있는데, 이는 앞의 두가지 평가지표 및 지진의 Duration Effect 를 포괄하는 것이다. 에너지에 근거한 구조물의 내진평가 (Energy-Based Seismic Evaluation)는 New Zealand 의 Canterbury 대학교에서 시작하여 New York 주립대학교 Buffalo 대학 (SUNY at Buffalo)을 중심으로 개발되었다. 이 논문에서는 구조물의 객관적인 내진성능 평가지표로서의 “지진에너지 흡수능력”을 소개하고자 한다.

2. 에너지 흡수효율 (Energy Absorption Efficiency)

여러가지 다른 형태 (기하학적 및 재료 그리고 Size 등)의 철근 콘크리트 구조물 상호간의 내진성능 비교는 에너지 흡수율 (Rate of Energy Absorption)을 비교함으로써 가능하다. 이를 위하여 잘

* 한양대학교 건축공학부 시간강사

** 한양대학교 건축공학부 교수, 정회원

알려진 일반적인 반복거동 법칙 (Hysteretic Rule)에 의한 값을 기준으로 삼는 것이 편리하다. 이를 위하여 탄성-완전 소성 (Elasto-Perfectly Plastic [EPP]) system 에 대한 구조물의 에너지 흡수효율을 고려하고자 한다. 그림 1(a)에 예시된 EPP System 에 의하여 흡수 누적된 에너지 (Cumulative Energy)는 Hysteretic Loop 의 평행사변형의 면적에 의하여 정의되는데, 이를 수식으로 표현하면,

$$E_{EPP} = (F_n^+ + F_n^-) \cdot \Sigma \Delta_p = (F_n^+ + F_n^-) \cdot h_c \Sigma \Theta_p \cdots (1)$$

이식에서 $(F_n^+ + F_n^-)$ = Nominal Mechanism Strength 의 합이고, $\Sigma \Delta_p = \Sigma(\Delta_p^+ + \Delta_p^-)$ = 누적된 소성변위 (Cumulative Plastic Drift)이며, h_c = 구조물의 순수길이이며, $\Sigma \Theta_p = \Sigma(\Theta_p^+ + \Theta_p^-)$ = 누적된 소성변위 각도 (Cumulative Plastic Drift Angle)이다. 대칭구조물 (Symmetrical System)에서는 $(F_n^+ + F_n^-)$ 는 $2F_n$ 으로 표현될 수 있는데, 이때에 F_n 은 메커니즘 평균 공칭강도이다. 대칭구조물에 앞뒤방향 같은 크기의 소성변위 각도 (Equi-Amplitude Plastic Drift Angle)를 유발하는 n 회의 반복하중이 작용할 때 EPP System 에 흡수된 누적에너지는 공식 (1)로부터 얻어진다. 즉

$$E_{EPP} = 4nF_n h_c \Theta_p \cdots (2)$$

여기서 만일 어떤 구조 System 이 EPP System 과 똑 같은 비율로 지진에너지를 소멸시킨다면, 이때의 효율 η 는 100%가 될 것이고, 이를 수식으로 표현하면

$$\eta = 1 = \frac{E_{EPP}}{2F_n h_c \Sigma \Theta_p} \cdots (3)$$

이 개념을 시각화하면, 공식 (3)은 그림 2, 3 에서 기울기 1의 직선으로 표현될 수 있으며, 에너지는 $(F_n^+ + F_n^-) \cdot h_c$ 에 의하여 Normalize 되었다. EPP System 에 대한 실험적 에너지 흡수효율은 공식 (3)의 E_{EPP} 대신에 E_{EXP} 를 사용하여 얻어지며, 그 형태는

$$\eta = \frac{E_{EXP}}{E_{EPP}} = \frac{\Sigma E_{cycle}}{2F_n h_c \Sigma \Theta_p} \cdots (4)$$

여기서 E_{EXP} 는 실험을 통하여 관측된 누적에너지 흡수량이고, E_{cycle} 는 1회의 반복하중당 소모되는 에너지로서 실험에서 관측된 힘과 변위곡선 (Force-Displacement Loop)에 의하여 둘러싸인 면적에 의하여 결정되며 수치해석기법을 이용하여 결정된다. 수식을 사용하여 표현하면

$$\Sigma E_{cycle} = \int_{cycle} F \cdot d\Delta = \Sigma \left(\frac{F_i + F_{i-1}}{2} \right) \cdot (\Delta_i - \Delta_{i-1}) \cdots (5)$$

여기서 F_i = step i 때의 횡력이며 Δ_i = step i 에서의 횡변위이다

3. 요구되는 누적 소성변위 (Cumulative Plastic Drift Demand)

앞에서 전개된 공식 (3)과 (4)에서 보이듯이 구조물의 누적에너지 흡수율은 누적된 소성변위 각도 Θ_p 에 따라서 변화하므로, 누적에너지 흡수율이 계산될, 특정지진에 대한 적절한 누적소성변

위 각도 요구량 (Cumulative Plastic Drift Demand) $\Sigma\Theta_p(d)$ 를 결정하는 것이 중요하다. 이를 위하여 순수길이 h_c , 무게 W 의 구조물에 횡 소성변위 각도 Θ_p 를 유발하는 반복하중이 작용한다고 가정한다. 이때에 이 구조물에 작용하는 n 회의 반복하중에 의하여 소모되는 에너지 (Hysteretic Energy) E_h 는 그림 1(a)에 예시된 빗금친 곡면의 면적에 해당한다. 이를 수식으로 표현하면

$$E_h = n\eta \cdot (2cW) \cdot (2\Theta_p h_c) \cdots (6)$$

여기서 η = EPP System 에 대한 구조물의 에너지 흡수효율, c = 구조물의 횡 하중 전달비 (Base Shear Coefficient), 그리고 $\Theta_p h_c = \Delta_p$ = 소성변위이다. 또한 $2cW$ 및 $2\Theta_p h_c$ 는 각각 구조물의 반복응답곡선 (Hysteretic Loop)의 강도축 (Force Axis)의 높이와 변위축 (Displacement Axis)의 너비를 나타낸다. Hysteretic Energy 를 구조물의 무게로 나눔으로써 Normalize 하면

$$\frac{E_h}{W} = 4\eta c \Theta_p n h_c \cdots (7)$$

이 공식에서 E_h/W 는 에너지 E_h 가 생성되기 위하여 요구되는 누적 소성변위량이라 할 수 있다.

이 관계로부터 누적 소성변위 각도 (Cumulative Plastic Drift Angle)가 정의될 수 있는데, 이는

$$\Sigma\Theta_p = 4\eta c \Theta_p n \cdots (8)$$

그러면 공식 (7)을 다음과 같이 표현할 수 있게 된다.

$$\frac{E_h}{W} = (\Sigma\Theta_p) \cdot h_c \cdots (9)$$

그러므로 특정 지진을 견디기 위하여 요구되는 에너지 흡수량 (Hysteretic Energy Demand)을 알게되면 Cumulative Plastic Drift Demand $\Sigma\Theta_p(d)$ 를 계산할 수 있게 되는데, 그 형태는

$$\Sigma\Theta_p(d) = \frac{E_h}{W \cdot h_c} \cdots (10)$$

Chang and Mander (1994)는 에너지 및 Low-Cycle Fatigue 에 근거하여 여러가지 지진과 거동모델에 대한 응답 스펙트럼을 개발하였는데, 그중 일부가 그림 1(b)에 예시되어 있다. 그들의 연구에 따르면 Cumulative Plastic Drift Demand 는 대개의 경우 $\Sigma\Theta_p(d) \leq 0.1$ rad., 안전측으로, 최대 발생 가능한 지진 (Maximum Credible Earthquake)에 대하여는 $\Sigma\Theta_p(d) \leq 0.2$ rad.이다. 그러므로 이 논문에서는 누적 소성변위 각도 0.2 rad.까지의 구조물의 에너지 흡수효율을 조사해 보기로 한다.

4. 적용예제 (Worked Example)

지금까지 전개된 에너지 흡수효율에 대한 이론을 두개 Group 의 실험결과에 적용하여 보기로 한다. 두개의 실험 Group 이라함은 다음과 같다.

Group I: 내진설계되지 않은 Prototype 원형기둥 L-Joint 의 내진보강 전과 후 (Mander, et al., 1996a);

내진설계되지 않은 1/3 모델 3개-원형기둥 포탈 Frame 의 내진보강 전과 후 (Mander, et al., 1996b).

Group II: 내진설계된 1/3 모델 원형기둥 T-Joint – 일반적인 철근 배근 (Conventional Rebar Details, CO); 수리가능한 힌지상세 (Renewable Hinge Detailing, R0 & R1); Precast (Mander and Cheng, 1995).

공시체 상세와 실험변수 (Test Variables)는 도표 1에 요약되어 있으며, 일련의 유사 정적 (Quasi-Static) 및 유사 동적 (Quasi-Dynamic) 횡 반복하중하에 시험되었다. 유사 정적 하중시험은 0.017 Hz의 Frequency로 실행되었고, 각 2회씩의 반복하중이 $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 4\%$, $\pm 5\%$ 변위각을 유발하도록 작용되었다. 유사 정적 하중시험에 이어서 유사 동적하중 시험은 0.17 Hz의 Frequency로 $\pm 5\%$ 변위각에서 실행되었다.

실험을 통하여 관측된 Group I, II의 공시체의 거동 (Hysteretic Performance) 및 에너지 흡수효율은 각각 그림 2, 3에 예시되어 있다. 각 공시체의 EPP System에 대한 에너지 흡수효율은 도표 2에 요약되어 있는데, 이는 누적 소성변위 각도 0.1 rad. 및 0.2 rad.에서 결정된 값이다.

5. 결론

1. 제안된 에너지 흡수능력에 의한 해석방법은 상대적, 객관적 관점에서 여러유형의 기하학적 및 재료적 측면에서 다른 구조물들을 지진에너지 흡수능력에 따라 비교할 수 있다.
2. 이 논문을 통하여 살핀 공시체들 대개의 경우 EPP System에 대한 에너지 흡수효율이 30% 내지 45%인 것으로 나타났으며 내진설계된 구조물들이 높은 에너지 흡수효율을 보여주었다.
3. 에너지 흡수효율에 의거하여 각기 다른 구조물들의 Analytical Hysteretic Models을 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위하여 다양한 구조물들의 충분한 실험적 연구가 선행되어야 한다.

6. 감사의 글

이 논문을 완성하는데 도움이 된 뉴욕 주립대학교 Buffalo 대학 (SUNY at Buffalo) 토목공학과와 Professor John B. Mander의 조언에 깊이 감사드린다. 또한 적용예제중 Group II의 실험결과를 제공하여준 Taiwan의 Dr. Chin-Tung Cheng에게 감사드린다.

7. 참고문헌

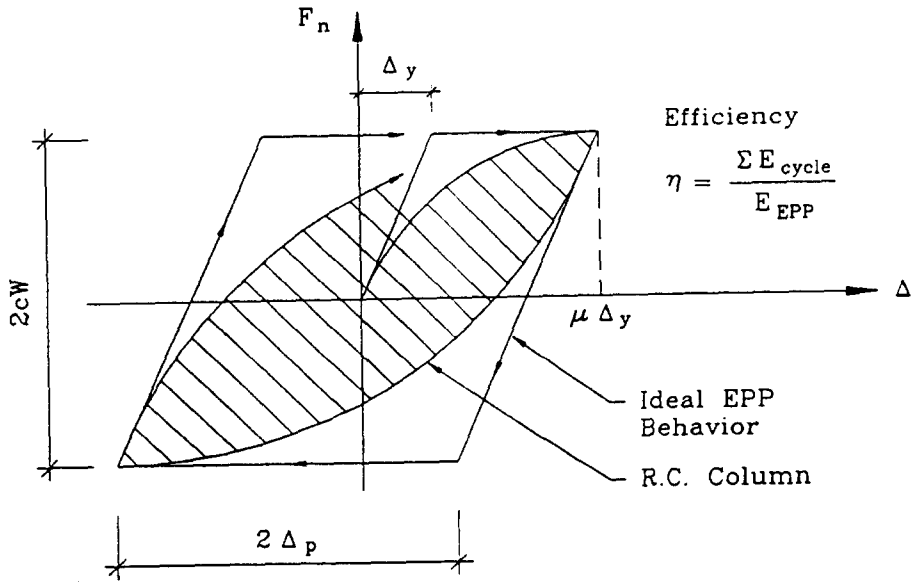
1. Chang, G.A. and Mander, J.B. (1994), *Seismic Energy-Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns, Part I: Evaluation of Seismic Demand*, Technical Report NCEER-94-0013, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.
2. Mander, J.B. and Cheng, C.-T. (1995), "Renewable Hinge Detailing for Bridge Columns", *Proceedings of Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Australia, November 20-22, pp. 197-206.
3. Mander, J.B., Mahmoodzadegan, B., Bhadra, S. and Chen, S.S. (1996a), *Seismic Evaluation of A 30-Year Old Non-Ductile Highway Bridge Pier and Its Retrofit*, Technical Report NCEER-96-0008.
4. Mander, J.B., Kim, J.H. and Ligozio, C.A. (1996b), *Seismic Performance of A Model Reinforced Concrete Bridge Pier Before and After Retrofit*, Technical Report NCEER-96-0009.

도표 1. 공시체 상세와 실험변수.

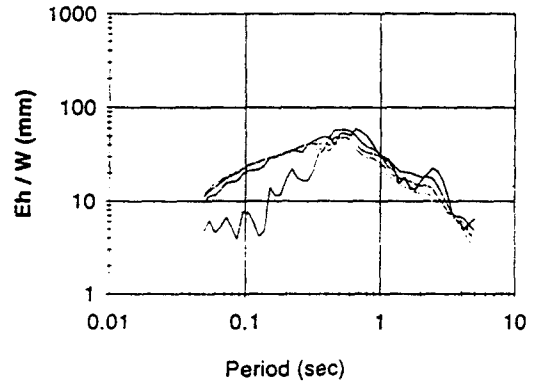
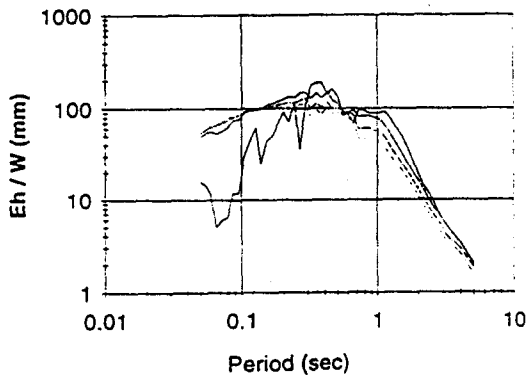
공시체	철근비		기동축력	순수부재길이
	ρ_t^a	ρ_v^b	$P / f_c' A_g$	h_c
Group I				
1/3 Model Before Retrofit	0.0186	0.0016	0.015	1854
1/3 Model After Retrofit ^c	0.0186	0.0016	0.016	1321
Prototype Before Retrofit	0.0186	0.0011	0.014	2045
Prototype After Retrofit ^c	0.0186	0.0011	0.014	1791
Group II				
Conventional, CO	0.025	0.007	0.08 (0.08) ^d	1245
Renewable Hinge, R0 (Virgin)	0.01	0.0081	0.096 (0.096) ^d	1245
Renewable Hinge, R1 (1 st Repair)	0.01	0.0094	0.096 (0.05) ^d	1245
Precast	0.01	0.018	0.224 (0.224) ^d	1245
^a Volumetric longitudinal steel ratio. ^b Volumetric transverse steel ratio. ^c Beam-column joints were retrofitted. ^d Numbers in () is for lap-splice region.				

도표 2. EPP System 에 대한 실험관측된 에너지 흡수효율.

공시체	Energy Absorption Efficiency η (%)	
	$\Sigma\Theta_p$ at 0.1 rad.	$\Sigma\Theta_p$ at 0.2 rad.
Group I		
1/3 Model Before Retrofit	38	34
1/3 Model After Retrofit ^a	38	34
Prototype Before Retrofit	23 ^b	23 ^b
Prototype After Retrofit ^a	34	30
Group II		
Conventional Detailing, CO	44	44
Renewable Hinge, R0 (Virgin)	44	42
Renewable Hinge, R1 (1 st Repair)	40	40
Precast	39	39
^a Beam-column joints were retrofitted. ^b Premature bond/anchorage failure.		

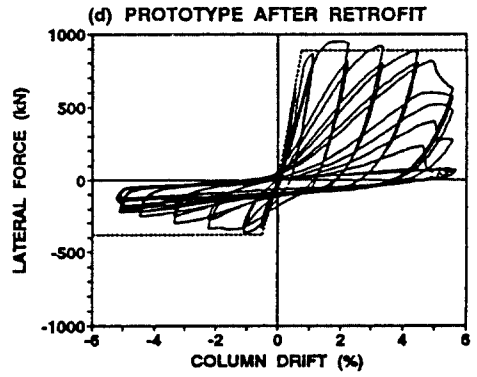
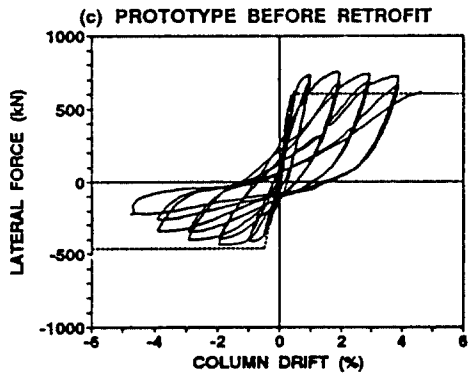
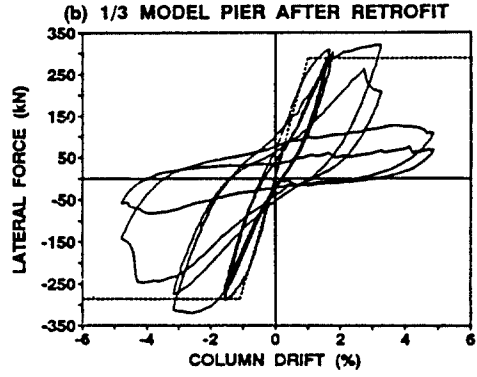
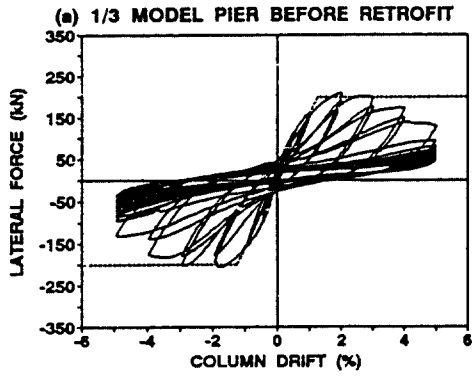


(a) 에너지 흡수효율의 정의.



(b) 에너지 흡수 요구량 스펙트럼 (Chang and Mander, 1994).

그림 1. 구조물의 에너지 흡수능력 (Capacity) 과 요구량 (Demand).



(e) Energy Absorption Capacity

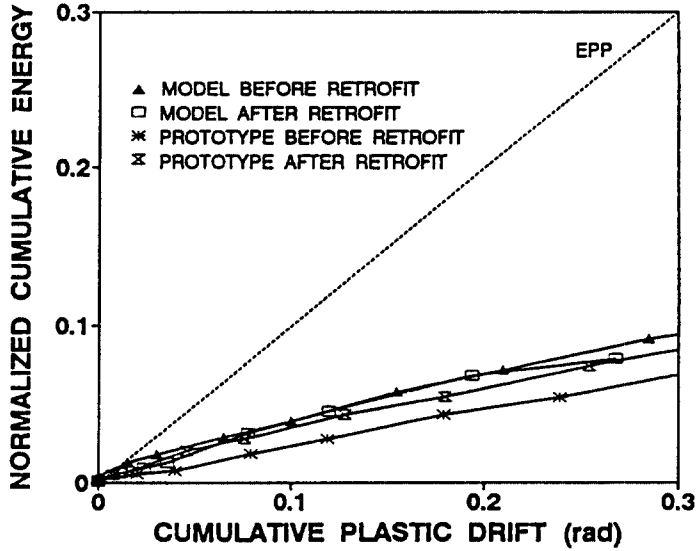


그림 2. Group I 공시체의 실험 관측된 거동.

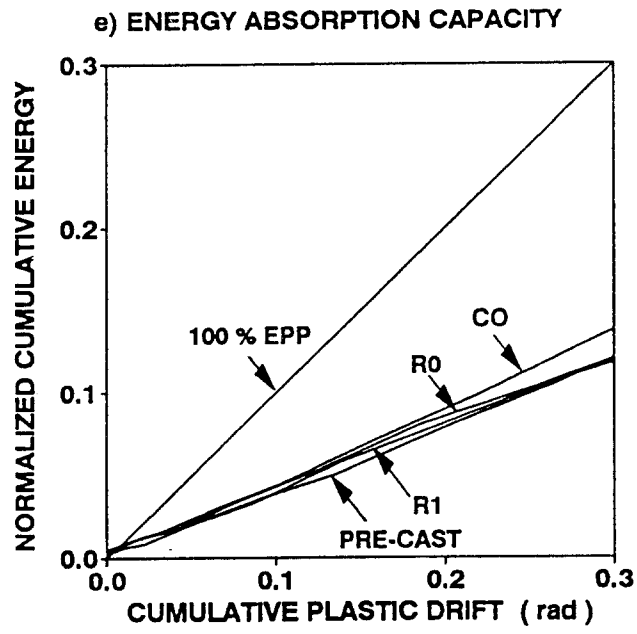
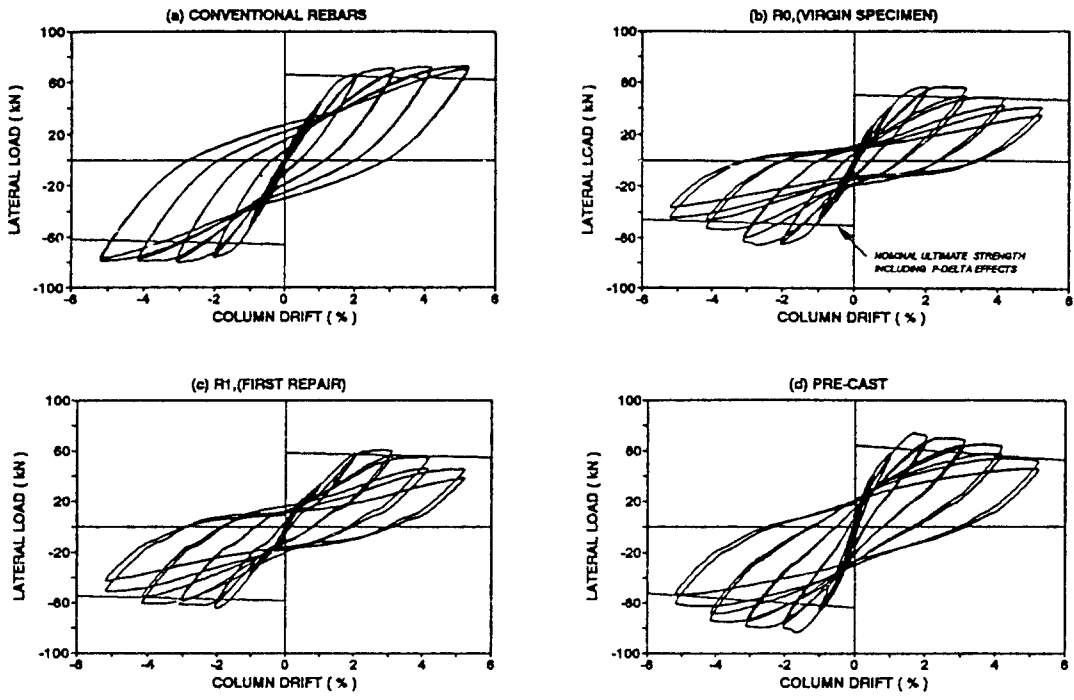


그림 3. Group II 공시체의 실험 관측된 거동.