

콘크리트충전 각형강관기둥-보 접합부의 거동에 관한 연구

Behavior of Beam-to-Concrete Filled Steel Tube Column Rigid Connections

김 철 환¹⁾ · 이 은 태²⁾

Kim, Cheol Hwan Lee, Eun Taik

요 약 : 콘크리트충전 강관기둥-보 강접합부의 역학적 특성을 규명하기 위하여 모델 시험체에 대한 반복가력 실험을 행하였다. 실험변수로는 항복부위, 내부다이어프램의 유공의 크기 및 슬래브 설치 유무이다. 보 항복형 시험체인 경우에는 다이어프램 항복형 시험체에 비하여 충강성이 높고 내력의 저하없이 높은 층간변형을 가지고 있다.

ABSTRACT : Experimental studies were carried out with test parameters: diaphragm yield type and beam yield type, the opening hole size of inner steel diaphragm, and the existence of slab in order to understand the behavior of beam-to-concrete filled steel tube column rigid connections under cyclic loading condition. Test results show that the connections have good rotational capacity when the beam yields first and the joints should be designed such that the beam yields prior to the inner diaphragms.

핵심용어 : 보-기둥 접합부, 반복하중, 충전강관, 내부 다이어프램, 반복하중

KEYWORDS : Concrete filled steel tube column, Beam-column connections, Inner diaphragm, Cyclic loading

1. 서 론

콘크리트충전 강관구조는 철근 콘크리트구조와는 달리 거푸집 및 내부 보강근 설치 작업등의 필요가 없어 건축시공적인 측면에 있어서 유효한 구조 형식이다. 역학적 특성에 있어서도 외부 강관의 구속효과에 의해 내부 콘크리트가 3축응력상태가 되어 압축강도가 증가하여 하중지지 능력(load carrying capacity)이 상승하며, 콘크리트의 압괴 이후에도 단면 결손이 없어 큰 폭의 내력저하없이 높은 변형능력(ductility)을 가지는

등 많은 장점^(1,2)을 가지고 있다. 또한, 콘크리트 충전 강관구조는 강관과 내부 콘크리트의 합성작용에 의해 동일단면의 순수 철판구조에 비하여 부재의 축방향 강성 및 휨강성이 크게 증가⁽³⁾하여, 지진이나 바람 등과 같은 수평하중에 의한 층간변위가 감소되므로 내진 설계에 유리한 특성을 가지고 있다.

한편, 도심지에서의 사선제한 등으로 인한 제한된 높이에서 보다 경제적인 건축물을 건설하기 위하여 철판보의 상플랜지가 콘크리트 슬래브내에 위치하는 그림1과 같은 형상의 변형된 합성보 시

1) 정회원, 상주대학교 전임강사, 공학박사
2) 정회원, 중앙대학교 기술과학연구소 선임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

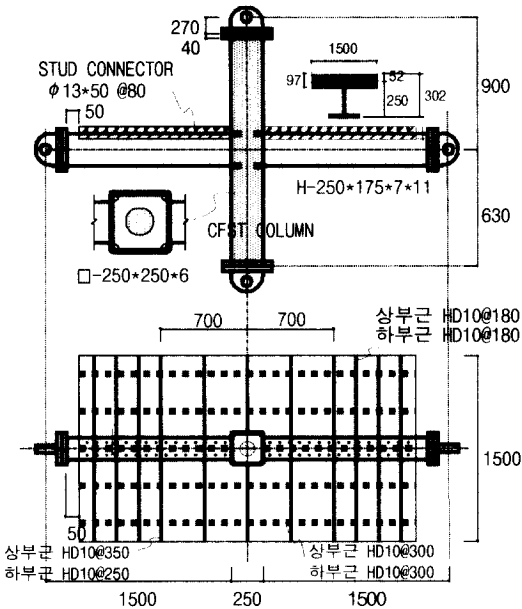


그림 1. 시험체의 형상

스텝이 제안되어 역학적 특성에 대한 연구⁽⁴⁾가 진행되어 왔으며, 기존의 합성보 시스템과 동등한 방법으로 내력 및 강성의 평가가 가능함이 입증되었다. 본 연구에서는 콘크리트충전 각형강관기둥과 H형보 및 변형된 합성보와의 강접합부에 대한 반복하중 실험을 통하여 접합부의 역학적 특성을 규명하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험 계획

2.1 시험체 계획

강접합부 실험을 위한 실험변수는 표 1에 나타내는 것과 같이 구조체의 항복형식으로 다이어프램 항복형과 보항복형으로 구분하였다. 또한 다이어프램 항복형인 경우 내부 다이어프램의 유공크기를 변수로 설정하였으며, 보항복형 시험체인 경우에는 슬래브 유무 및 시험체 형태(±자형, †자형)로 구분하였다. 단, 모든 시험체에 있어서 기둥의 폭두께비는 강관의 한계 폭두께비인 40으로 하였다.

표 1. 시험체 일람

시험체 명	실험 변 수			축력비 (축력)
	항복형	다이어프램 크기 (유공직경×두께)	슬래브 유무 (시험체 타입)	
R40DN-1	다이어프램	125×5	무 (±자형)	0.3P _u (110ton)
R40DN-2		165×22	무 (†자형)	
R40BN	보	125×13	무 (±자형)	
R40BS			유 (±자형)	
R40BST			유 (†자형)	

R 40 B S(T)

- ┌ : 시험체 형태(T: †자형)
- └ : 슬래브 유무(S: 슬래브 유, N: 슬래브 무)
- ┌ : 항복부위 (B: 보, D: 다이어프램)
- └ : 폭 두께비 (40: 폭두께비=40, 60: 폭 두께비=60)
- └ : 접합부 형태(R: 강접합부)

2.2 사용재료

시험체에 사용되는 강재로서는 기둥부재 및 내부 다이어프램의 경우 SM490A를 보부재에 있어서는 SS400을 사용하였다.

콘크리트는 내부 충전콘크리트의 경우 설계강도가 300kg/cm², 슬래브 콘크리트의 강도는 240kg/cm²을 사용하였으며, 슬래브와 보와의 전단연결장치로서는 스티드커넥터 $\phi 13$ 을 사용하였다. 콘크리트의 공시체시험결과 및 각형강관의 기계적 성질은 표 2와 표 3과 같다.

표 2. 공시체 실험결과

공시체종류	강도 설계강도 (kg/cm ²)	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)
충전콘크리트	300	372	47
슬래브콘크리트	240	270	33

* 압축강도 및 인장강도는 공시체 실험결과와 평균치임

표 3. 강재의 기계적성질

강재 종류	Grade	실측두께 (mm)	항복강도 (kg/mm ²)	인장강도 (kg/mm ²)	연신율 (%)	
다이어프램	SM	PL-4.5	4.22	41	52	34.1
		PL-12	11.73	38	53	43.4
		PL-22	-	30	46	40.2
각형강관 기둥	PL-6.0	5.95	42	49	36.2	
보 플랜지	PL-11	SS400	10.89	27	44	43.2

* 강도 및 연신율은 측정결과와 평균치

2.3 시험체 형상 및 가력방법

시험체 형상은 그림1에 나타내는 것과 같이 구조체에 수평외력이 작용할 경우 기둥과 보에 형성되는 반곡점을 기준으로 분해한 가구(assembly) 형상으로 제작하였으며, 시험체 제작에 사용된 기둥단면은 □-250×250×6의 각형강관을 제작·사용하였으며 건설교통부의 표준시방서⁽⁵⁾에 의해 제작하였다. 보단면은 H-250×176×7×11인 압연형강 제품을 사용하였다.

시험체 가력방법은 그림2에 나타낸다. 그림에서와 같이 기둥의 상단부 및 보의 양단부의 지지조건을 핀지지 조건으로 한후 기둥의 하단에 설치한 오일 잭을 이용하여 기둥에 축력을 도입하여 축력이 일정하게 유지하면서 보단부에 설치한 액츄에이터를 이용하여 역대칭 반복가력을 하였다.

그림2에 있어서 기둥에 작용하는 전단력 및 층간 변위는 아래식으로 산정할 수 있다.

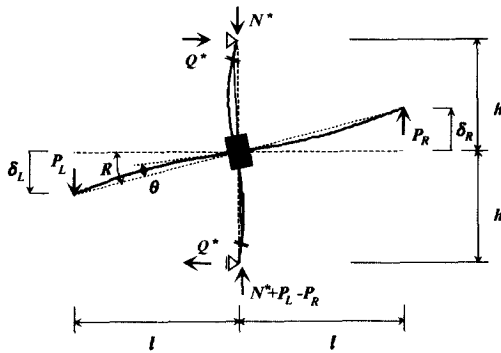


그림 2. 시험체 가력방법

$$Q^* = \frac{P_L + P_R}{2} \cdot \frac{l}{h} \quad (1)$$

$$R = \frac{\delta_L + \delta_R}{2l} \quad (2)$$

실험시 가력은 탄성범위에서는 하중제어로 2회 반복가력하였으며, 항복이후에는 층간변위각으로 변위제어를 하였다. 액츄에이터(actuator)의 스트로크(stroke)가 한계치에 도달하였을 경우에는

액츄에이터를 재설치하여 최대하중점까지 일방향으로 가력하여 실험을 종료하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가구(assembly)의 층전단력-층간 변형 각관계

그림4(a)~(e)는 각시험체의 층전단력-층간 변형 각 관계를 나타낸다. Q는 가구(assembly)의 수평전단력에 상당하는 것으로서 그림2에 나타내는 실험방법으로 부터 측정된 기둥의 전단력으로 부터 식(3), (4)에 의해 산정된 것이며, 따라서 그림3은 기둥에 작용하는 축력에 의한 PΔ효과가 고려된 것이다.

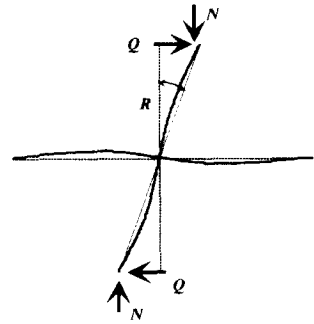


그림 3. 층전단력-층간변형각

$$N = N^* + Q^* \cdot R \quad (3)$$

$$Q = Q^* - N \cdot R \quad (4)$$

그림4에 있어서 경사진 점선은 부재의 전소성 모멘트로부터 산정된 각 시험체의 층전단력을 나타내고 있다.

모든 시험체가 항복내력 범위내에서는 탄성적인 거동을 하고 있으며, 최대내력점에서의 층간변형 각은 0.03rad.전후의 변형능력을 나타내고 있다. 다이어프램 항복형인 R40DN-1시험체의 경우 다른 시험체에 비하여 최대내력이후의 내력저하가

급격하게 일어나고 있으나, R40DN-2시험체의 경우에는 예상최대 내력을 크게 상회하고 또한 최대내력이후의 내력저하도 거의 발생하지 않는 특징을 나타내고 있다. 이러한 현상은 다이어프램의 설계식⁽⁶⁾이 양단 고정단 보로서 판단하여 설계하도록 하고 있으므로 다이어프램의 내공의 직경이 클수록 과다설계가 되어 다이어프램의 항복이 아닌 보항복형의 거동을 하기 때문으로 판단된다.

보항복형 시험체인 그림4(c)~(e)의 경우에는 최대 충전단력이후의 내력저하가 완만하게 나타나고 있다. 그러나, 그림4(e)에서와 같이 기둥의 한쪽에만 합성보가 설치된 T형(T형) 시험체인 경우에는 합성보의 정횡방향으로는 합성보의 전소성 내력에 의한 충전단력에 도달하지 못하고 있다. 이러한 현상은 합성보의 단부가 기둥에 의해 콘크리트의 지압과괴가 발생하여 최대내력에 도달하지

못하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 부횡방향으로의 충전단력은 계산상의 최대 충전단내력을 상회하고 있다.

가구(assembly)의 충전단력에 대한 강성은 그림5에 나타낸다. 다이어프램 항복형인 R40DN시험체와 보항복형인 R40BN시험체에 있어서 충전단강성은 거의 대등하게 나타나고 있으나, 다이어프램 항복형인 R40DN-1시험체의 경우 초기에 강성의 저하현상이 나타나고 있다. 또한 합성보 접합부시험체인 경우 순수H형보 접합부시험체에 비하여 충전단강성이 20%전후로 높게 나타나고 있어 동일한 수평전단력에 대해 수평변위가 작아짐을 알 수 있다. 또한 기둥의 한쪽에 합성보가 설치된 경우에는 보의 강비가 작으므로 수평변위가 크게 일어나고 있다.

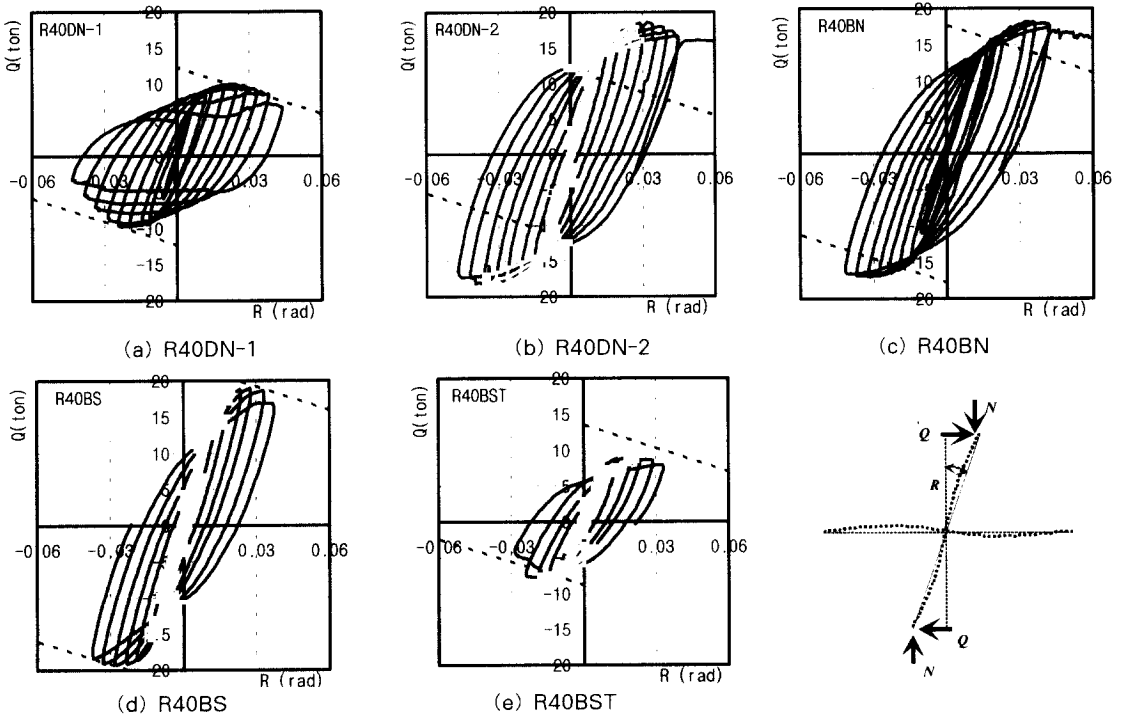


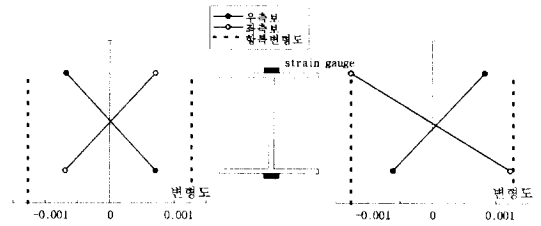
그림 4. 충전단력-충간변형각 관계

3.2 가구(assembly)의 총전단내력

가구(assembly)의 총전단내력은 표4에 나타난다. 표중의 실험치는 그림2에 의한 방법으로 산정된 것으로서 기둥의 PA 효과는 고려되지 않은 순수한 전단내력을 나타내고 있다.

가구(assembly)의 항복전단내력은 R40DN-2 시험체를 제외하고는 모든시험체가 계산치를 하회하고 있다. 이러한 현상은 항복전단내력을 산정함에 있어 초기강성의 연장선과 초기강성의 1/3인 점의 순간강성의 연장선과의 교점값을 실험치로 취하고 있음으로 인하여 실구조물이 항복전단내력과 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

그림6은 보항복형인 R40BN시험체의 보 플랜지의 항복 변형도와 전단내력과의 관계를 나타낸다. 계산에 의한 항복전단내력 수준에서의 플랜지



(a) 실험치 산정점 (11.48ton) (b) 풀랜지항복점 (16.5ton)

그림 6. 플랜지의 변형도와 총전단내력(R40BN)

의 변형도는 항복변형도에 미치지 못하고 있으나, 보의 플랜지가 항복변형도에 도달하였을 경우에는 계산상의 항복내력을 거의 일치하고 있다.

최대내력에 있어서는 기둥의 한쪽으로 합성보를 설치한 R40BST시험체를 제외하고 모든시험체가 계산치와 동등 또는 상회하고 있다.

3.3 보의 단부모멘트-회전각관계

각시험체의 재단 모멘트와 회전각 관계는 그림 7에, 보단부의 최대 모멘트의 실험치 및 계산치는 표5에 나타낸다. 표중의 다이어프램 항복형 시험체의 보단부 최대 모멘트는 아래식⁽⁶⁾에 의해 산정된 다이어프램의 최대내력에 의해 계산된 값을 나타내고 있다.

$$P_a = (D - d_f)^2 \frac{b_f \cdot t_s}{d_f^2} \sigma_y \quad (5)$$

$$P_u = \frac{2.14}{1.5} \times P_a \quad (6)$$

$$M_u = P_u \cdot j_d \quad (7)$$

- P_a : 다이어프램의 항복내력
- P_u : 다이어프램의 최대내력
- M_u : P_u 에 의한 최대모멘트
- b_f : 보플랜지의 폭
- d_f : 다이어프램의 개구부의 직경
- D : 강관기둥의 폭
- σ_y : 강재의 항복응력도
- t_s : 다이어프램의 판두께
- j_d : 상하 다이어프램간 거리

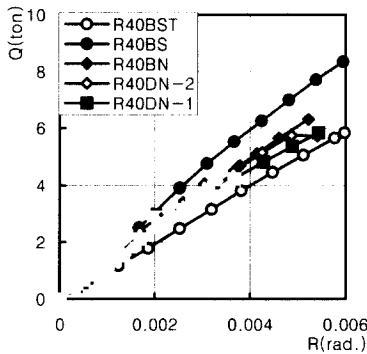


그림 5. 가구(assembly)의 총강성

표 4. 총전단 내력

시험체명	계 산 치		실 험 치	
	항복내력 (t)	최대내력 (t)	항복내력 (t)	최대내력 (t)
R40DN-1	8.43	12.37	8.40	13.90
R40DN-2	8.67	12.04	16.06	22.76
R40BN	16.18	17.77	11.48	23.32
R40BS	18.14	22.49	15.53	22.23
R40BS-T	10.05	13.60	8.33	11.75

* 항복내력의 실험치는 초기강성의 연장선과 초기강성의 1/3점에서 순간강성 연장선과의 교점의 값

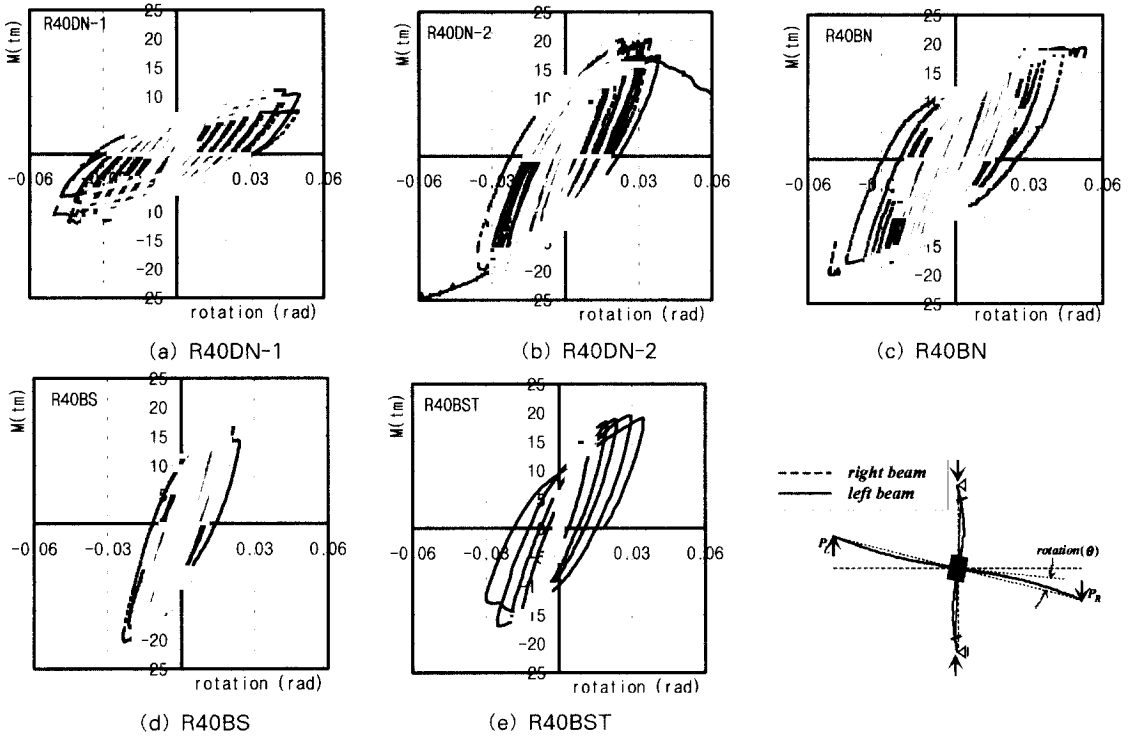


그림 7. 보단부 모멘트-회전각 관계

실험결과에서 알 수 있듯이 다이어프램 항복형 시험체인 R40DN-1 시험체의 경우 보의 전소성 모멘트에는 미치지 못하고 있으나, 다이어프램의 최대내력에 의한 최대모멘트는 상회하고 있다. 그러나, 최대 모멘트이후의 내력저하는 다른 시험체에 비하여 급격하게 일어나고 있다.

한편 같은 다이어프램 항복형 시험체로서 내부 콘크리트의 충전성을 향상시키기 위하여 유공의 크기를 크게하고 두께를 두껍게한 R40DN-2 시험체의 경우에는 다이어프램의 최대내력에 의한 모멘트보다 65%이상 높은 값을 나타내며, 보의 전소성 모멘트보다도 10%이상 높은 값을 나타내고 있다. 보항복형 시험체인 R40BN시험체의 경우에는 계산치를 30%이상 상회하고 있으며, 실험종료시인 부재 회전각이 0.05rad.에서도 내력의 저하는 거의 일어나지 않고 있다. 합성보 시험체의 경우에는 실험치가 계산치에 도달하기전에 내력의 저하가 발생하며, 합성보의 고유한 이력특성인 역S자 이력거동의 양상도 나타나지 않고 있다. 이러한 현상은 보단부에 있어서 슬래브가 기둥과 접하는 부분에만 압축력이 발생하여 슬래브

표 5. 보단부 최대 모멘트

시험체명	계산치 (tm)		실험치* (tm)	
	정	부	정	부
R40DN-1	10.28		10.68, 11.84	
R40DN-2	10.01		24.97, 16.71	
R40BN	14.76		19.30, 19.31	
R40BS	22.61	14.76	20.31, 18.24, 19.44, 17.78	
R40BST	22.61	14.76	19.51, 16.95	

*실험치는 좌측보와 우측보의 보단부 최대 휨 모멘트를 나타낸다.

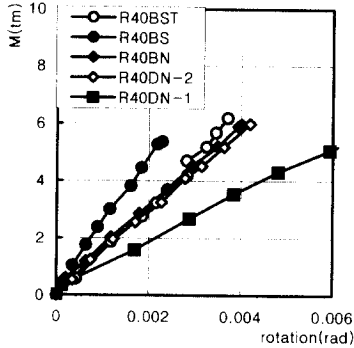


그림 8. 보의 초기강성

가 지압으로 파괴되기 때문에 판단된다.

그림8은 각 시험체의 보단 모멘트-회전각관계를 비교하여 나타낸다. 다이어프램 항복형 시험체인 R40DN-1시험체의 경우에는 다른 시험체에

비하여 초기강성이 낮게 나타나고 있으며, 다이어프램 항복형시험체중 R40DN-2시험체는 보항복형시험체와 동등한 초기강성을 나타내고 있다. 또한 합성보 시험체중 R40BS시험체인 경우에는 슬래브와 H형보의 합성효과에 의해 초기강성이 높게 나타나고 있으나, 한쪽에만 합성보가 설치된 R40BST시험체의 경우에는 슬래브와 보의 합성효과가 나타나지 않고 순수철골보 시험체와 동등한 초기 강성을 나타내고 있다.

3.4 내부 다이어프램의 변형

그림9는 수평전단력에 의한 내부 다이어프램의 변형도를 나타내고 있다. 다이어프램의 측면부위에 부착된 다이어프램은 전반적으로 최대내력에 도달할 때 까지 탄성거동을 하고 있다. 그러나 보

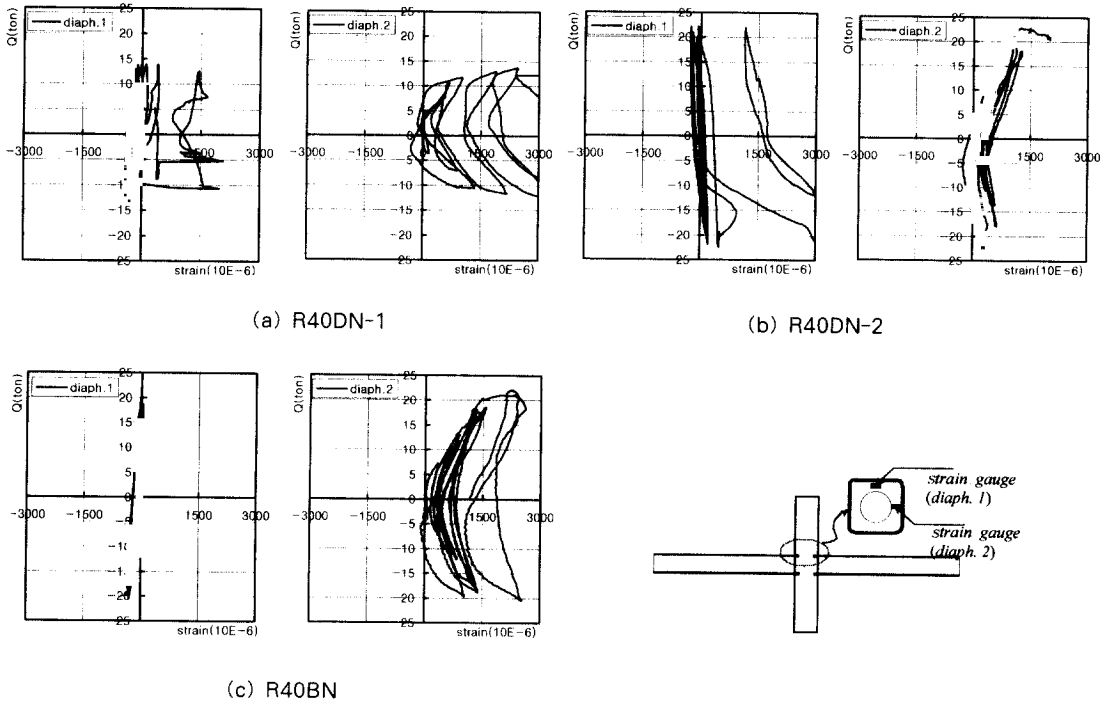


그림 9. 다이어프램의 변형도

방향의 다이어프램에 있어서는 다이어프램 항복형인 R40DN-1시험체의 경우 반복하중에 의해 변형이 누적되어 항복하고 있으며, R40DN-2시험체의 경우에는 다이어프램항복형으로 설계되었지만, 보항복형인 R40BN시험체보다도 변형이 적게 발생하고 있으며 최대 내력점에 도달하여도 다이어프램은 항복하지 않고, 탄성범위에 있다. 따라서 다이어프램의 유공의 크기를 크게 할 경우 식(5)~(7)에 의해 설계할 경우 과다설계되어 설계시 상정한 파괴형상과 달라질 수도 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 반복하중을 받는 콘크리트충전 각형강관기둥-보 접합부 거동을 확인하기 위해 기둥과 보의 반곡점을 기준으로 분해한 가구(assembly)실험을 수행하였다. 얻어진 결론은 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 모든 시험체가 항복 충전단력 범위에서는 탄성적인 거동을 나타내고 있다.

2. 최대 충전단내력 이후의 안정적인 거동을 위하여 보항복형 설계가 바람직하다.

3. 기둥의 한쪽으로부터 합성보가 설치되는 경우에는 기둥면으로부터 압축력으로 슬래브가 지압 파괴를 일으켜 전소성 모멘트에 도달하기전에 내력의 저하현상이 일어나며, 충전단변형도 크게 발생하고 있다.

4. 내부 다이어프램 설계시 문헌(6)에 의한 설계법은 다이어프램의 내공의 크기에 따라 과다 설계될 수 있으므로 새로운 설계법의 정립이 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) 김동규 외2인: 콘크리트충전 각형강관의 국부좌굴 보강효과 및 폭두께비 제한에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제6권 제1호, pp389-392, 1986.4
- (2) 김규석, 심종석: 콘크리트 충전 각형강관단주의 내력에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 제13권 2호, 1997.2
- (3) 김철환, 정하선: 콘크리트충전 각형강관기둥의 역학적 특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 제13권 5호, 1997.5
- (4) 대한주택공사: 철골조 초고층 아파트 시스템 개발연구III, 1996. 12
- (5) 건설부: 건축공사 표준시방서, 1994
- (6) 日本建築學會: 鋼管コンクリート構造計算規準・同解説, 1981
- (7) 대한건축학회: 강구조산규준 및 해설, 1983
- (8) Matsui, C., Keira, K., Kawano, A., Tsuda, K. and Sakai, J.: Development of Concrete Filled Steel Tubular Structures with Inner Ribs, Proceedings of the 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, Fukuoka, Japan, September 26-29, p.p. 201-206, 1991
- (9) Saeki, S., Minosaku, K., and Takizawa, A.: Behavior of Concrete-Filled Steel Tubes (Part 3: Beam-Column Members), Seismic Research for Highway Bridges (US-Japan Program), Department of Civil Engineering, University of Pittsburgh, p.p. 209-227, 1984

(접수일자 : 1998년 10월 24일)