

준정적 실험에 의한 중공원형 콘크리트 교각의 소성응답 연구

Research of Plastic Response by Quasi-Static Test for Circular Hollow R.C. Bridge Pier

정 영 수¹⁾
Chung, Young-Soo

한 기 훈²⁾
Han, Gi-Hoon

이 강 균³⁾
Lee, Kang-Kyun

ABSTRACT

Because of relatively heavy dead weight of concrete itself and unavoidable heat of massive concrete in bridge piers, circular hollow columns are widely used in Korean highway bridges. Since the occurrence of 1995 Kobe earthquake, there have been much concerns about seismic design for various infrastructures, inclusive of bridge structures. It is, however, understood that there are not much research works for nonlinear behavior circular hollow columns subjected to earthquake motions.

The ultimate of this experimental research is to investigate nonlinear behavior of hollow reinforced concrete bridge piers under the quasi-static cyclic load test, and then to enhance their ductility by strengthening the plastic hinge region with glassfiber sheets.

It can be concluded from Quasi-static test for 7 bridge piers that approximate 4~5 ductility factor can be experimentally obtained for bridge piers nonseismically designed in conventional way, which approximate 5~6 ductility factor for those seismically designed.

1. 서 론

본 연구는 충전단면에 대한 교량교각의 Quasi-Static 실험연구 「충진단면 콘크리트교각의 내진성능에 관한 준정적 실험」에 연속으로 수행된 연구로서 중공단면의 콘크리트 교각에 대한 Quasi-Static 실험연구이다. 최근, 중공단면 교각이 구조물의 자중 및 사용재료의 경감을 통한 경제적 및 구조적인 측면에서 고속도로 교량 및 기타 교량에서 널리 설계·시공되어지고 있다. 그러나, 국내·외적으로 중공단면 교각의 지진에 대한 연구가 미흡한 실정에 있으므로 중공단면 교각의 지진에 대한 거동특성의 연구·해석이 요구된다.

본 연구는 보다 경제·구조적인 특성에서 설계·시공된 중공단면의 교각에 대하여 준정적 실험(Quasi-Static Test)을 통하여 지진에 대한 비탄성 거동 및 연성거동 능력을 실험적으로 조사하고 나아가 콘크리트 교각의 연성능력을 향상시키기 위한 유리섬유보강 효과를 파악하여 내진성능을 평가하고자 한다.

1) 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

2) 중앙대학교 토목공학과 석사과정

3) 중앙대학교 토목공학과 석사

2. 연구내용

대상모델은 국내의 내진 1등급으로 설계된 수원시의 하갈교의 교각을 대상으로 하여, 1/3.4 축소 모델로 중공원형시험체를 제작하여 축하중, 심부횡방향 철근비, 하중 Pattern을 달리 하여 실험하였다. 표1.은 대상모델과 축소모델의 비교상세이다.

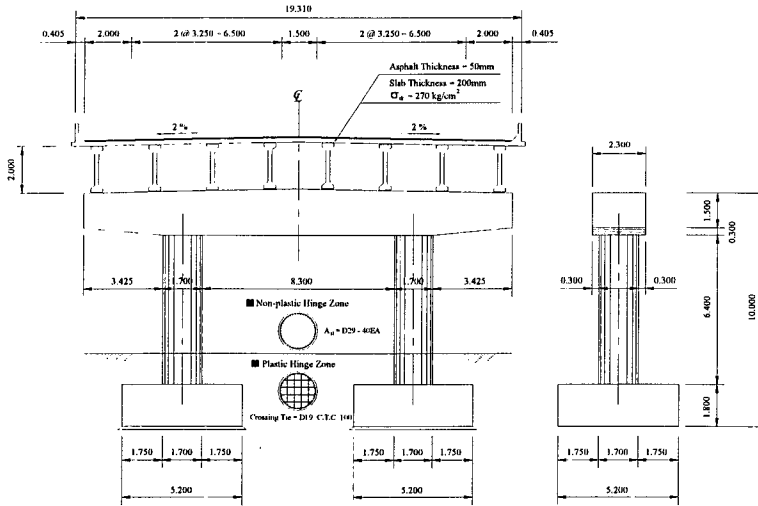


그림 1. 수원시 하갈교 교각상세도

표 1. Prototype과 시험체의 상세비교

	Prototype	Specimen	Remark
종방향철근	40@D29 (28.6 mm)	32 @D10 (9.53 mm)	$\rho = 1.1\%$
띠철근	D19 (19.1 mm)	#6 wire (4.8 mm)	
띠철근 간격	plastic hinge zone : 100 mm 그 외 : 150 mm	plastic hinge zone : 18 mm 그 외 : 23 mm	
기둥 직경	170 cm	60 cm	
기둥 길이	6.40 m	1.882 m	
사하중	497.9 t	43.07 ton, 70.6 ton	

2.1 사용 철근 및 콘크리트 특성

축소모델에서의 철근은 KS D 3504에 의한 SD40의 D10의 상용철근을 주철근으로, 횡방향철근 경우 열처리된 #6 Wire를 사용하였으며 KS B 0802에 따라 각각의 3개의 시편에 대한 인장실험을 하였으며 실험결과는 그림 2와 같으며 그림에 보여진 바와 같이 D10의 경우 변형률 0.020와 0.293에 각각 항복점과 극한점을, 열처리 #6 Wire의 경우 변형률 0.016와 0.210에 각각 항복점과 극한점을 구하였다.

사용된 콘크리트의 특성은 대상 교량구조물 기둥의 콘크리트의 설계기준강도가 240 kg/cm^2 으로 설계되었으며 본 연구에서 사용된 콘크리트 배합 및 $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 로 제작된 공시체의 28일 압축강도는 표 1.과 같다. KS F 2405에 따른 공시체의 압축강도 실험결과 약 242 kg/cm^2 로서 설계기준강도에 유사한 값을 얻었다.

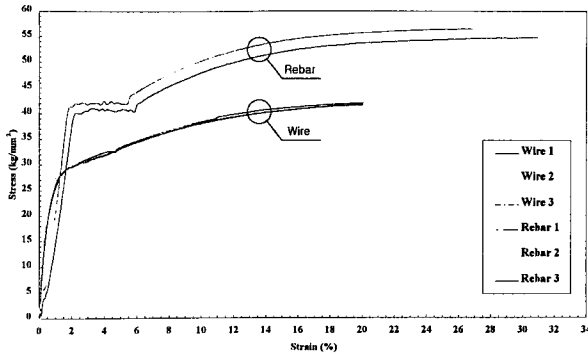


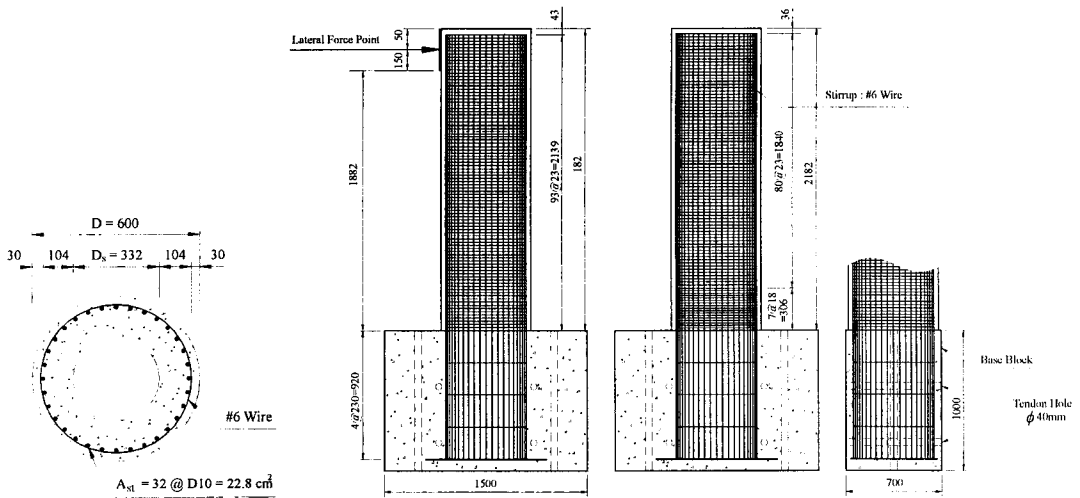
그림 2. 사용철근의 응력-변형률 곡선

표 2. 콘크리트 배합표

굵은 골재 최대치수	13 mm
슬럼프	12 cm
W/C	46.1
잔골재율	49 %
물	169 kgf/m³
시멘트	375 kgf/m³
잔골재	866 kgf/m³
굵은 골재	937 kgf/m³
AE 감수제	1.88 kgf/m³
압축강도	242 kgf/cm²

3. 시험체 상세

Quasi-Static 실험에 사용된 총 7기의 시험체는 경기도지역의 실존 RC구조물인 하갈교를 축소된 모델을 이용하였으며 축소비율은 시험체의 해석 및 시공이 용이하도록 1/3.4를 이용하였다.



(a) 시험체 단면형상

(b) 내진설계 미적용시험체 (c) 내진설계 적용시험체

그림 3. 시험체의 제원 및 배근

표 3. 시험체 상세

		시험체명	띠철근 간격	축방향 하중	하중조건
무보강	내진설계	CH1P1L1	1.8 cm	43.07 ton	Type I
		CH1P1L2	1.8 cm	43.07 ton	TypeII
		CH1P2L1	1.8 cm	70.60 ton	Type I
		CH1P2L2	1.8 cm	70.60 ton	TypeII
유리섬유 보강	내진설계 미적용	CH2P1L1	2.3 cm	43.07 ton	Type I
		CH2P1L2	2.3 cm	43.07 ton	TypeII
		CH2P1L1-R	2.3 cm	43.07 ton	Type I

※ Note : CH1 - 내진설계 적용시험체 CH2 - 내진설계 미적용시험체
 P1 - 축하중1(43.07ton)시험체 P2 - 축하중2(70.60ton)시험체
 L1 - 횡방향 3Cycle 반복하중조건 L2 - 횡방향 10Cycle 반복하중조건

표 3에는 시험체의 제원을 나타내었다. 실험변수로는 내진설계적용여부에 따른 띠철근비, 축방향 하중증가에 따른 축방향력 및 피로거동에 따른 하중재하 형태, 유리섬유보강으로 분류하였다.

한편, 내진설계 미적용 시험체에 대한 유리섬유의 보강은 내진설계시의 plastic hinge range인 기초상단에서 기둥의경(D)을 기준으로 D/2 높이까지는 유리섬유 4장, D/2 이상 D 높이까지는 3장을 보강하였으며 응력집중을 막기 위하여 Taper구간을 두었다.

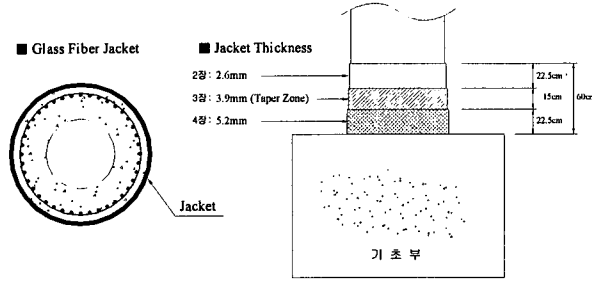


그림 4. 유리섬유보강 시험체

4. 실험 하중 및 실험 장치

Quasi-Static 실험을 위하여 사하중을 고려한 축방향력은 100ton Oil Jack을 이용하여 일정한 값으로 유지하였고, 횡방향의 반복수평하중은 그림 5와 같이 재하하였다. 수평하중은 100kN Hydraulic Actuator를 이용하는 변위제어방식을 채택하였다.

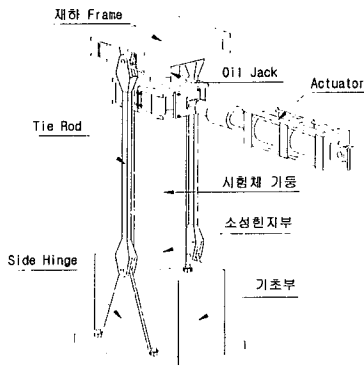


그림 5. 시험체 하중재하 개념도사진

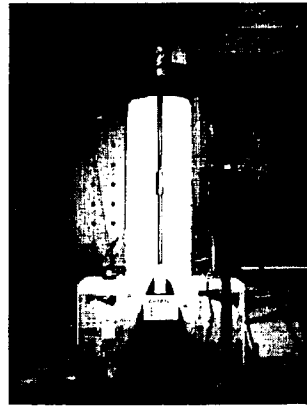
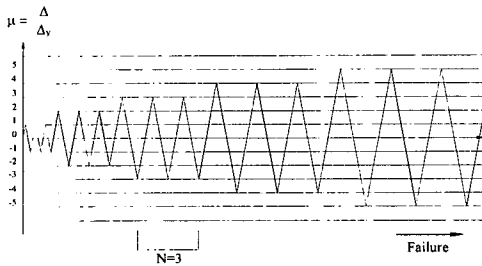
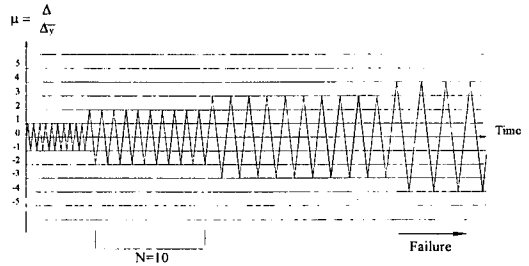


사진 1. 시험체 Setup



(a) Load Type I



(b) Load Type II

그림 6. 수평반복하중의 이력

기둥시험체의 항복변위 Δ_y 는 탄성해석을 통하여 이론적인 휨능력에 상응하는 수평하중의 75% 값을 하중제어방식으로 1회 반복하여 그 때의 측정된 종방향철근의 변형률 평균값을 이용하여 변형률이 0.002에 해당되는 변위값 Δ_y 를 기둥시험체의 하복변위로 계산하여 실험을 수행하였다. 수평하중형태는 실험을 통하여 얻은 Δ_y 에 대하여 그림 6과 같이 3 Cycle의 일반거동 Type과 10 Cycle의 피로거동 Type의 형태로 반복재하하였다.

축하중 1은 대상구조물의 사하중을 근거로 하여 축소모델에 상응하는 $0.10 \sigma_{ck} A_g$ 의 43.07 ton을 가하였으며, 축하중 2는 축하중의 증가에 따른 기둥의 거동을 알아보기 위해 $0.15 \sigma_{ck} A_g$ 에 해당되는 70.6 ton을 가하였다.

5. 실험 계측

5.1 하중 · 변위 및 철근변형률 측정

수평하중은 반력벽에 1,000kN Hydraulic Actuator (Stroke: ± 250 mm)를 설치하여 변위제어방식으로 재하하였으며, 시험체의 횡방향변위를 측정하기 Actuator 반대편에 기초상면에서 17cm, 49cm, 109cm, 그리고 185 cm 위치에 LVDT 4개를 설치하였다. 또한 예상치 못한 하중제하 직각방향으로의 변위 및 기초부의 이동 · 휨변위발생에 대하여 LVDT CH5~7를 그림 7와 같이 설치하였다.

Plastic Hinge Zone에서의 철근변형 거동을 파악하기 위하여 그림 8과 같이 기둥시험체의 종방향 철근에 4개의 strain gauge를 부착하고, 횡방향철근에 2개의 strain gauge를 부착하였다.

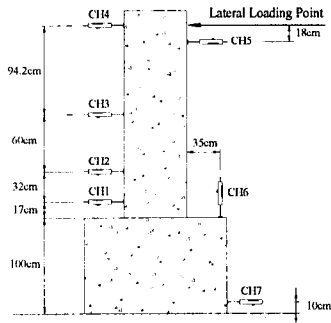


그림 7. LVDT 설치도

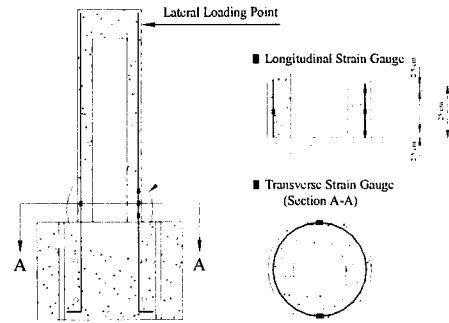


그림 8. Steel Gauge 설치도

5.2 곡률측정

기둥의 곡률은 기둥 저면에서부터 높이 50 cm 구간에 수평하중재하 방향과 동일하게 하여 기둥 양쪽면에 Clip gauge를 3개씩 각각 설치하였다. Clip Gauge는 탄성스프링동판에 4개의 Strain Gauge의 회로도를 Wheatston Bridge로 형성시켜 제작하였다.

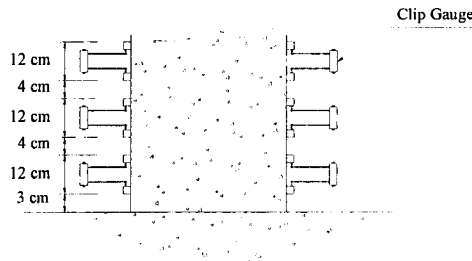


그림 9. Clip Gauge 위치도

6. 실험결과

6.1 하중-이력곡선

본 실험에서 내진설계로 제작된 시험체가 내진설계 미적용 시험체에 대하여 Load Pattern I, II에 대하여 변위연성도가 약 1~2단계가 더 우수하게 나타났으며, 유리섬유보강시 변위연성도가 내진설계의 효과를 초월하였다.

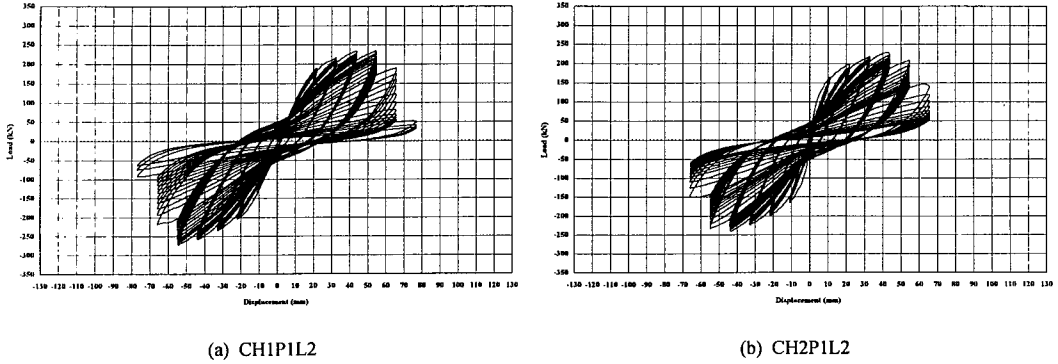


그림 10. 시험체의 하중-이력곡선

하중-이력곡선의 결과에 대하여 미국 ASSHTO와 도로교 시방서에서 사용되는 응답수정계수 R 에 대하여 요구되는 변위연성도 μ 를 Blume의 제안식($R = \sqrt{2\mu - 1}$)에 의하여 단주연성능력 $\mu = 5$ 에 대하여 내진설계 적용 및 보강시험체에서 충분히 확보하고 있으며 내진설계를 적용치 않은 시험체 역시 임계상태로서 만족하고 있다.

6.2 하중-변위 포락곡선 및 에너지 흡수

하중-이력곡선에 대한 포락곡선은 그림 11와 같이 나타나며 내진설계적용 시험체가 적용하지 않은 시험체에 대하여 최대하중 및 변위에 대하여 우수하게 나타나고 있으며 Actuator의 Push방향에 대하여 파괴를 나타내었으나 CH2PIL1의 경우에는 Actuator Pull방향에 대하여 파괴가 먼저 발생되었다.

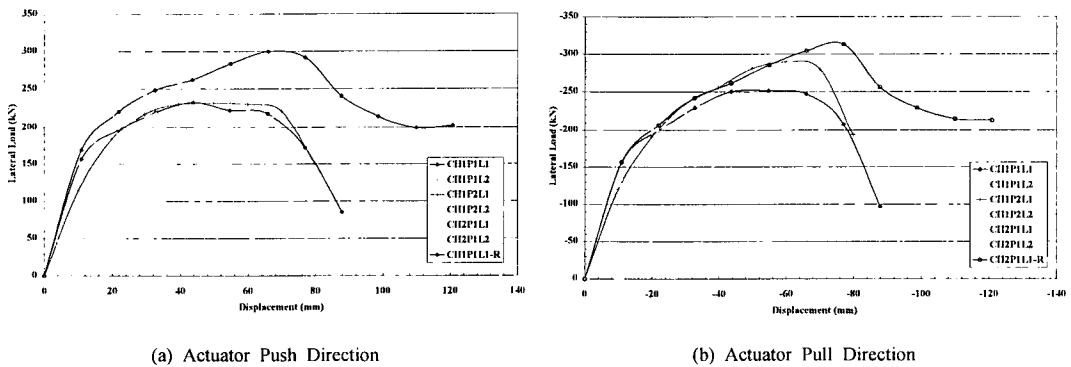
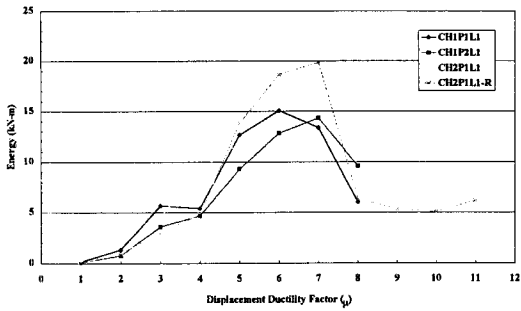
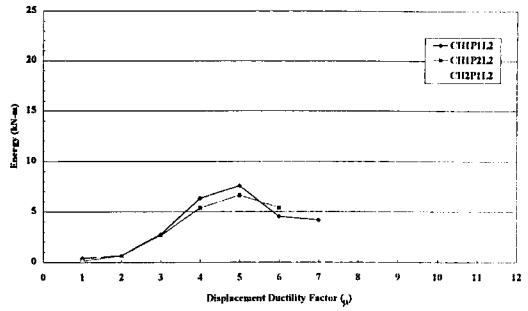


그림 11. 하중-변위 포락곡선

각 Cycle별 에너지 흡수는 그림 12과 같이 내진설계 미적용시험체에 대하여 적용한 시험체의 에너지 흡수능력이 우수하게 나타났으며 하중조건에 대하여 피로하중조건인 시험체가 약 50% 에너지 흡수능력의 저하효과가 나타났다.



(a) Load Type I

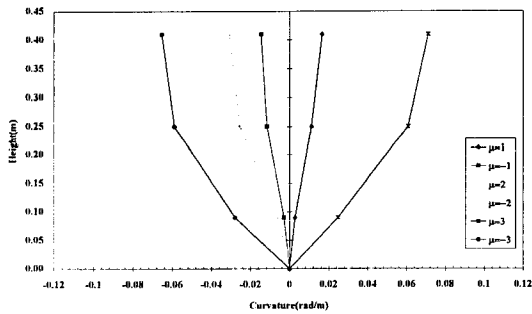


(b) Load Type II

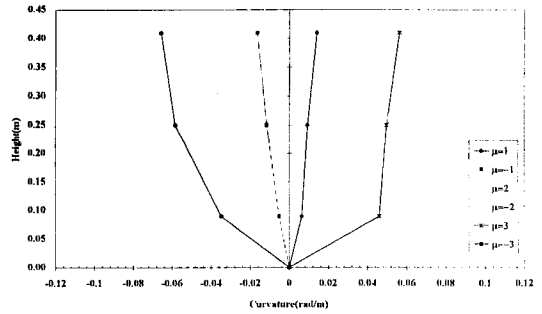
그림 12. 에너지 흡수곡선

6.3 누적곡률 결과

Clip gauge를 통하여 계측된 누적곡률의 결과는 그림 13와 같으며, 각 시험체의 높이별 누적곡률은 각 위치별 상태가 선형적 변화일 때 탄성거동을 나타내며 비선형적 변화에서는 비탄성 거동 상태를 나타내고 있다.



(a) CH1P1L2

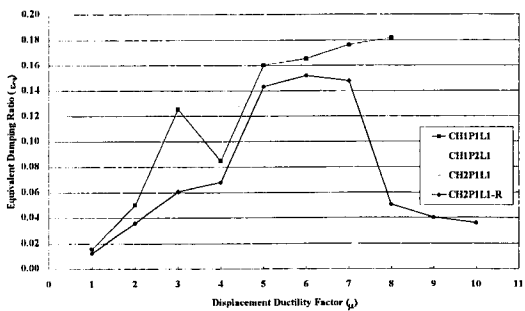


(b) CH2P1L2

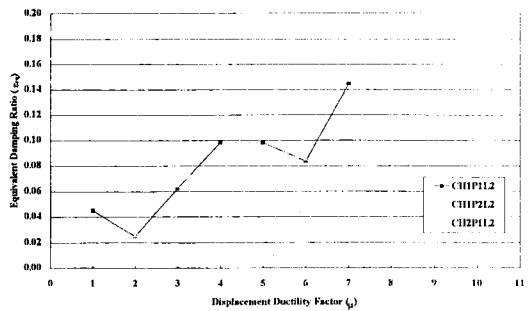
그림 13. 시험체의 높이별 누적곡률

위의 결과에서 내진설계에 의하여 Plastic Hinge 구간이 보강된 시험체가 내진설계 미적용시험체에 대해 연성도에 따른 곡률변화가 보다 선형적으로 분포되어 우수한 효과를 나타내고 있다.

6.4 등가점성감쇄비 및 강도저하 결과



(a) Load Type I



(b) Load Type II

그림 14. 시험체의 연성비에 따른 ϵ_{eq} 변화

이력특성에 대한 진동감쇠의 큰 요인인 에너지 소비에 대하여 감쇠성을 탄소성응답에 대하여 감쇠를 동반하는 탄성응답으로 치환한 Jacobsen의 등가점성감쇠비는 그림 14와 같이 나타났다.

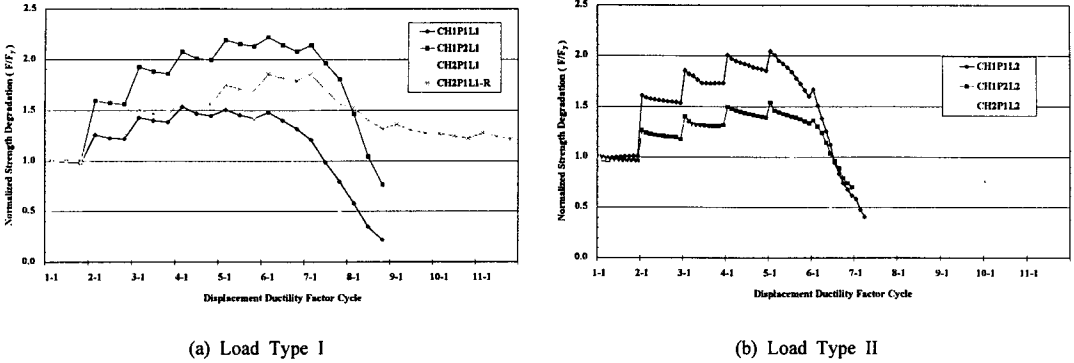


그림 15. 시험체의 반복하중에 따른 강도저하율의 변화

초기 극한하중(F_y)에 대한 각 Cycle별 하중(F)의 정규화된 강도감소에 대한 결과는 그림 15와 같다. 강도저하는 내진설계 적용 및 보강시험체가 적용하지 않은 시험체에 대하여 연성도에 따른 강도감소가 우수하게 나타났다.

연성률에 따른 등가점성감쇠비 및 강도감소율에서는 축방향 철근이 보강되고 축방향력이 작은 경우에 보다 우수하게 나타났으며 각각의 반복하중단계별 강도저하 역시 내진설계 및 보강시험체의 경우 1~2단계가 더 우수하게 나타났다.

7. 결 론

본 연구는 경기도 수원시 하갈교를 대상으로 하여, 1/3.4 축소모델로 단일주형식의 교각 시험체를 제작하여 Quasi-Static Test로 실험을 수행하였으며, 내진설계 미적용 시험체의 내진성능 향상을 위한 보강법으로 유리섬유복합재로 교각을 보강하였다. 실험연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 내진설계에 의한 Hollow Section R.C 기둥은 변위 연성도(μ)를 5~6으로 기대.
- ② 내진설계 미적용시험체도 시방서규정 의하여 설계된 경우 적절한 연성도($\mu = 4 \sim 5$) 확보.
- ③ 유리섬유보강을 통하여 변위 연성도가 내진설계 시험체의 연성도값이상으로 향상.
- ④ 유리섬유보강시 기둥·기초부의 Cold Joint에 대한 적절한 보강기법이 요구.

결론적으로, 중공단면의 철근콘크리트교각의 내진능력은 본 실험에 앞서 수행된 충전단면 철근 콘크리트교각에 대하여 보다 우수하게 평가(변위연성도 1단계 향상)되었으나 유리섬유보강효과에 있어서는 충전단면의 성능향상에 미치지 못하였다. 즉 Cold Joint부의 응력집중에 대하여 중공단면의 단면변화부에 대한 보강이 충전단면의 경우에 앞서 시급히 보완되어야 될 할 것이며, 이에 따른 보강법의 개발이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1996), "도로교 표준시방서"
2. 한국지반공학회(1997), "진동 및 내진설계", 구미서관
3. 한국전산구조공학회(1997), "구조물의 내진설계", 한국전산구조공학회 기술강습회 자료집
4. Newmark, Rosenblueth(1971), "Fundamental of Earthquake Engineering", PrenticeHall
5. Benson H.Tongue(1996), "Principle of Vibration", Oxford University Press
6. Y.H.Chai, M.J.N.Priestley, Frieder Seible(1991), "Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for

- Enhanced Flexural Performance", ACI Structural Journal V.88, No. 5, 9-10, pp572~584
7. A.B.Ghee, M.J.N.Priestley, T.Paulay(1989), "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete", ACI Structural Journal V.86, 1-2, pp 45~59
 8. M.J.N.Priestley, R.Park, "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading", ACI Structural Journal V.84, 1-2, 1987, pp 61~76
 9. F.A.Zahn, M.J.N.Priestley, R.Park(1990), "Flexural Strength and Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns Without Confinement on Inside Face", ACI Structural Journal V.87, No. 2, March-April, pp 156~166
 10. Jack P. Moehle(1988), "Strength of Slab-Column Edge Connections", ACI Structural Journal V.85-S11, November-December, pp 89~98
 11. R. Park, T. Paulay, "Reinforced Concrete Structures", JOHN WILEY & SONS, Inc, pp 118~194
 12. M.J.N. Priestley, F.Seible, G.M.Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", JOHN WILEY & SONS, Inc.