

주철근 겹침이음 및 보강된 RC교각의 이력거동

Hysteretic Behavior of Retrofitted RC Bridge Piers with Lap Spliced Longitudinal Steels

이 대 형* 정 영 수** 박 창 규*** 박 진 영**** 송 희 원*****
Lee, Dae-Hyoung Chung, Young-Soo Park, Chang-Kyu Park, Jin-Young Song, Hee-Won

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate of seismic performance for reinforced concrete bridge piers with lap splices of longitudinal reinforcement steels using predicting of nonlinear hysteric behavior. For the purpose, enhanced analytical trilinear hystretic model has been proposed to simulate the force-displacement hysteretic curve of RC bridge piers under repeated reversal loads. The moment capacity and corresponding curvature in the plastic hinge have been determined, and the enhanced hysteretic behavior model by five different kinds of branches has been proposed for modeling the stiffness variation of RC section under cyclic loading. The strength and stiffness degradation index are introduced to compute the hysteretic curve for various confinement steel ratios. In addition, the modified curvature factor has been introduced to forecast of seismic performance of longitudinal steel lap spliced and retrofitted specimens.

The results of this research will be useful to predict of seismic performance for longitudinal steel with lap spliced and its retrofitted specimens.

1. 서 론

철근콘크리트 교각의 내진성능은 일반적으로 연성과 에너지 흡수능력으로 평가된다. 이는 교각이 극한강도에 도달한 후 비탄성거동에 의해 추가의 에너지를 흡수할 수 있는 능력으로 평가된다. 철근콘크리트 교각은 주철근비, 구속철근비, 축력 및 형상비(Asspect ratio)에 의해 각기 다른 파괴양상과 연성을 보이고 있다. 이에 많은 연구자들이 다양한 실험변수를 갖는 시험체를 통하여 실험적으로 내진성능을 평가하였다. 하지만, 모든 실험변수에 따른 내진성능을 실험적으로 평가하는데는 한계가 있으므로 해석적인 접근이 불가피하다. 따라서 지진에 의해서 구조물이 비선형 거동을 하게 되고, 이에 따른 연성도를 확보하고 있어야 하는데 소성힌지영역 내에 주철근의 겹침이음이 있게 되면 충분한 정착길이를 가지고 있어도 지진하중과 같은 반복하중을 받게 되면 겹침이음부의 조기파괴가 발생하게 되어 세계 각국의 내진설계규정에서는 교각의 소성힌지구간에서의 주철근겹침이음을 엄격히 금지하고 있다.

그러나 1992년 내진설계규정도입 이전의 국내의 기존 설계교각의 상당수는 소성힌지영역내에 주철근에 겹침이음이 시공상의 이유 등으로 시공되었을 것이다.

이러한 교각을 내진설계규정에 만족할 수 있도록 하기 위해 재시공하는 것은 많은 경제적 어려움이

* 정희원, 경북도립 경도대학 건설환경과 조교수(dhlee@gpc.ac.kr)

** 정희원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수(chung47@cau.ac.kr)

*** 정희원, 중앙대학교 토목공학과 박사과정(parkcg@ms.cau.ac.kr)

**** 정희원, 중앙대학교 토목공학과 석사(pooh90@dreamwiz.com)

***** 정희원, 중앙대학교 토목공학과 석사과정(song77@post.cau.ac.kr)

예상된다. 따라서 적절히 연성능력을 향상시킬 수 있는 내진 보강방법인 교각의 취약한 곳에 Steel jacket, Concrete jacket, Composite materials jacket 보강 등에 의한 내진성능향상을 꾀하는 것이 경제적이고 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 교각의 내진성능을 평가하고자 기존의 실험 및 해석적 연구를 토대로 주철근의 겹침이음과 보강과 같은 실험변수를 가진 철근콘크리트 교각의 연성능력을 평가하고자 한다.

2. 반복하중에 의한 철근콘크리트 교각 실험

2.1 실험개요

본 연구의 해석기법 및 타당성을 검증하기 위하여 반복이력하중에 의한 철근콘크리트 교각의 준정적실험을 통한 결과와 비교하였다. 주요 실험변수는 축하중비를 10%로 하고 겹침이음량, 구속철근비 및 보강을 채택하여 표1에 나타난 바와 같다. 시험체의 단면은 원형 충전단면(Circular solid type)으로 하였으며, 휨파괴를 유도하기 위하여 형상비(Aspect ratio)를 4.0으로 설정하여 높이 240cm로 결정하였다. 시험체 상세는 그림 1과 그림 2에 나타내었으며 소성힌지구간의 띠철근은 D6철근을 비내진시험체의 경우 122mm의 간격으로 배근하여 구속철근비 0.156%이다. 마찬가지로 중저진 시험체의 경우 50mm로 배근하여 구속철근비 0.62%, 내진시험체는 30mm로 배근하여 구속철근비는 1.4%이다. 상세한 실험개요는 관련논문[정영수 등(2002), 이대형 등(2002)]에 기술하였다.

표 1 시험체 상세

Specimen	Concrete Strength (MPa)	Longitudinal Reinforcement Steel			Transverse Reinforcement Steel			Axial Load (kN)	Retrofit
		f_y (MPa)	ρ_l	Lap splice	f_y (MPa)	ρ_s	Spacing (mm)		
N-SP00-P1-R0	29	450	0.0113	-	353	0.00156	122	664.4 ($P/f_{ck}A_g = 0.1$)	None
N-SP05-P1-R0				50%		0.00156	122		SEH-51
N-SP05-P1-R1				50%		0.00156	122		CAFG 1000
N-SP05-P1-R2				50%		0.00156	122		None
L-SP00-P1-R0				-		0.00622	50		
S-SP00-P1-R0				-		0.014	30		

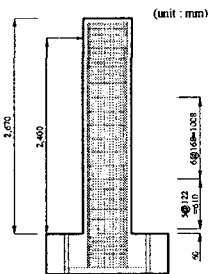


그림 1 시험체 상세도

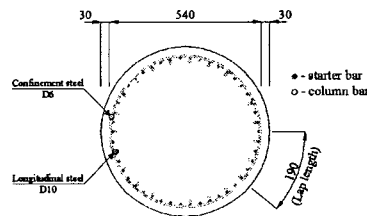


그림 2 후프띠철근 형태

2.2 실험결과분석

주철근의 겹침이음에 따른 시험체를 비교한 결과, 다음 그림 3(a)와 같이 50% 주철근 겹침이음된 시험체의 경우 주철근의 부착파괴에 의한 급격한 포락곡선의 저하를 보였다. 그러나, 50%겹침이음된 시험체의 경우에도 유리섬유 등으로 보강을 할 경우 충분한 연성능력을 회복하는 것으로 평가되었다.

또한, 주철근의 겹침이음은 파괴변위 및 극한변위의 감소를 야기하는 것으로 조사되었으며 보강시험체의 경우 극한변위와 파괴변위가 겹침이음이 없는 기준시험체와 거의 유사한 것으로 조사되었다.

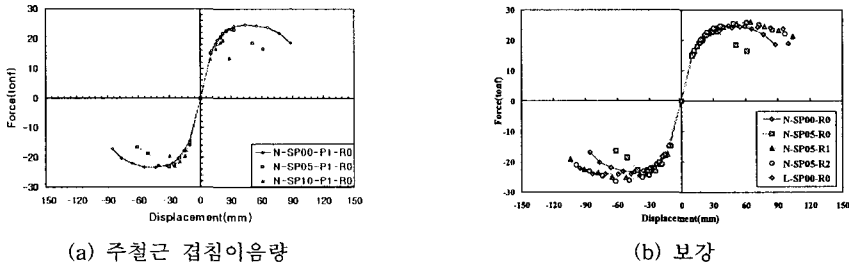


그림 3 하중-변위 포락곡선

3. 철근 콘크리트 부재의 이력거동

3.1 콘크리트 및 철근의 응력-변형을 관계

본 연구에서 사용한 콘크리트의 응력-변형을 곡선은 다음 그림 4와 같이 Chung과 Meyer 등(1987)의 3선형 곡선으로 정의하였으며 곡선에서 탄성 구간의 기울기, 비탄성구간의 기울기 및 비탄성구간의 하강곡선의 기울기로 정의하였다. 각각의 기울기는 콘크리트의 강도 및 임계 변형률에 대한 구속철근의 효과, 즉, 구속철근의 체적비에 따른 영향을 반영하였다. 사용하중 하에서 발생된 균열 등으로 인한 콘크리트의 인장강도는 무시하였다.

또한, 철근콘크리트 부재에 사용된 인장철근의 응력-변형을 곡선은 그림 5(a)와 같이 탄성구간 및 비탄성 구간의 2선형 곡선으로 나타내었으며 비재하 구간의 기울기는 비탄성 구간의 기울기의 2배로 정의하였다. 압축철근은 항복강도를 지나도 피복 콘크리트가 파괴되지 않으면 좌굴현상을 일으키지 않으며 항복강도를 계속 유지하는 것으로 가정하였으며 피복 콘크리트의 변형률이 극한 변형률에 도달할 경우 파괴되는 것으로 가정하였다.(그림 5(b))

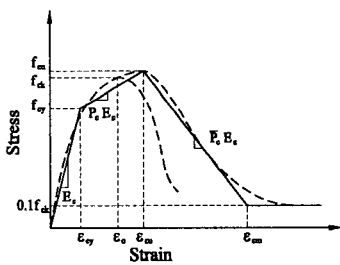
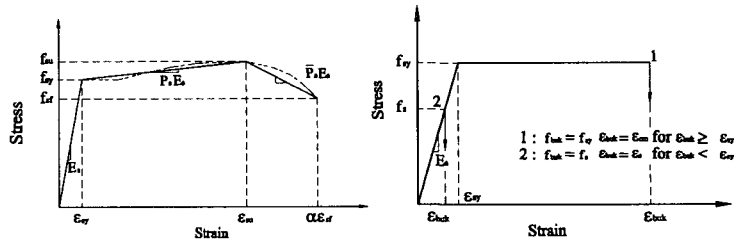


그림 4 콘크리트의 응력-변형을 관계



(a) 인장철근

(b) 압축철근

그림 5. 철근의 응력-변형을 관계

3.2 철근콘크리트 교각의 모멘트-곡률 관계

단조하중하에서의 모멘트-곡률곡선은 그림 6과 같이 탄성하중구간, 비탄성하중구간(즉, 변형을 경화구간)과 비재하구간의 3선형 곡선으로 나타낼 수 있다. 이 모멘트-곡률곡선은 철근과 콘크리트의 각각의 응력-변형을 법칙을 이용하여 부재의 단면적이 주어지면 인장철근 또는 압축콘크리트의 변형률을 0에서부터 예상되는 파괴형태시의 변형률까지 증가시키면서 반복적으로 단면의 중립축을 구하고 단면의 소성중심에 대한 휨모멘트 강도를 구하였다. 그림 3에서와 같이 주철근 겹침이음된 교각의 포락곡선에서 극한곡률과 파괴곡률이 겹침이음이 없는 시험체에 비해 줄어드는 경향을 보이고 있다. 따라서

본 연구에서는 겹침이음시험체의 내진성능을 평가하기 위해 다음 식(1)과 같이 겹침이음시험체의 모멘트-곡률 관계를 수정하였다.

$$\phi_{u, lap} = \gamma \phi_u \quad (1)$$

여기서, $\phi_{u, lap}$ 은 주철근 겹침이음된 시험체의 극한곡률이며 γ 는 주철근 겹침이음에 따른 모멘트-곡률관계를 수정하기 위한 수정곡률계수(Modified curvature factor)이다. 50% 주철근 겹침이음 시험체의 경우 본 연구에서 대략 0.5정도를 사용하고 보강시험체의 경우 1.1~1.5정도이다.

3.3 해석적 이력거동모델

철근콘크리트 교각은 반복하중 하에서 단조하중의 경우와 달리 철근과 콘크리트 사이의 부착강도의 저하 등으로 인하여 파괴의 원인이 되기도 한다. 본 연구에서는 반복하중 하에서 강성계수의 변화를 해석적으로 모형화 하기 위한 이력거동 모델식으로 Chung 등(1987)이 3선형 곡선을 수정향상시킨 각기 다른 강성을 갖는 다음 그림 7과 같은 5가지 지선을 갖춘 형태의 해석적 이력거동모델을 해석적 강도 및 강성 감소 산출식을 보완한 새로운 제안식을 도출하였다. 이는 탄성적 재하 및 비재하 구간, 비탄성적 재하구간, 비탄성적 비재하구간, 균열폐합 동안의 비탄성적 재하구간, 균열폐합 후의 비탄성적 재하구간으로 구성되었다. 또한 강도저하를 고려하기 위하여 그림 7과 같이 Chung 등(1987)이 제시한 강도감소량 S_d 를 다음 식 (2)와 같이 가정하였다.

$$S_d = \left(\frac{\phi - \phi_y}{\phi_f - \phi_y} \right)^{2\lambda} = \left(\frac{\phi - \phi_y}{\phi_f - \phi_y} \right)^\omega \quad (2)$$

여기서, λ 는 상수이고 강도감소지수 ω 에 따라 강도감소의 정도가 결정된다. 변수 ω 는 실험적으로 구할 수 있는 상수이며 축방향 하중, 주철근 량 및 띠철근 구속량의 영향을 받는다.

비탄성구간 즉, 균열이 발생한 단면에 반복하중 작용시 저항하는 전단력은 주로 인장철근의 다우웰작용에 의하여 지지되므로 작은 강성계수 값을 나타내지만 균열폐합후에는 전단마찰 및 골재의 상호 맞물림 등에 의하여 부재의 강성계수는 급격한 증가현상을 보이는 것은 많은 실험을 통하여 입증되었다. 전단에 의한 해석 모델은 이대형 등(2000)의 연구결과를 이용하였다.

4. 내진성능평가

4.1 실험 및 해석결과

본 연구에서는 그림 1과 표1과 같은 철근콘크리트 교각에 대하여 수치해석을 수행하여 수치해석결과와 비교하였다. 실험은 반복하중에 의한 준정적실험을 수행하였으며 하중재하는 연성도 $\mu=1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 \dots$ 의 형태로 재하하였다. 그림 9(a)는 주철근 겹침이음이 없는 시험체(N-SP00-P1-R0)로

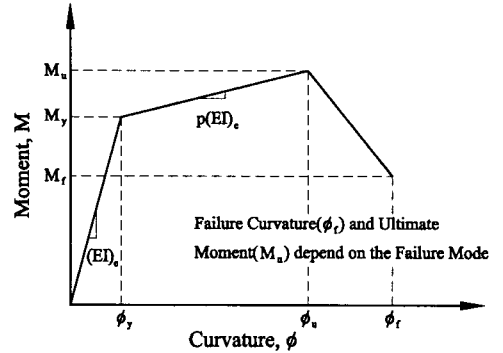


그림 6 철근콘크리트 교각의 모멘트-곡률 관계

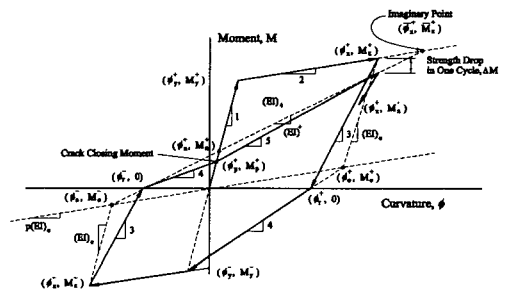


그림 7 강도감소 곡선

강도 및 강성감소 지수를 0.58과 3.5를 사용하였다. 그림 9(b)는 주철근이 50%겹침이음된 시험체(N-SP05-P1-R0)로서 철근콘크리트 교각의 내진성능에 상당한 영향을 미치는 변수인 주철근비, 구속철근비 및 축하중비가 N-SP00-P1-R0 시험체와 동일하므로 같은 강도 및 강성감소지수를 사용하고 주철근의 겹침이음의 영향을 고려하기 위하여 곡률수정계수(Modified curvature factor), γ 를 0.45를 사용하였다.

또한, 그림 9(c), (d)는 유리섬유로 보강된 시험체에 대한 실험 및 해석결과이다. 그림 9(c)는 TYFO SHE 51, 그림 9(d)는 CAF GL-1000으로 보강된 시험체이다. 상세한 보강재료의 물성은 Chung Y. S.(2002) 등에 나타내었다. 보강된 시험체(N-SP05-P1-R1,R2)의 구속철근비는 겹침이음된 시험체(N-SP05-P1-R0)와 같으므로 동일한 강도 및 강성감소지수를 사용하였으며 곡률수정계수, γ 를 1.1 및 1.5를 사용하였다. 곡률수정계수의 차이는 TYFO SHE 51의 인장강도가 549Mpa, CAF GL-1000의 인장강도가 490Mpa이며 마찬가지로 섬유 두께가 각각 1.3 및 1.0mm로 TYFO SHE 51을 이용하여 보강한 시험체(N-SP05-P1-R1)가 상대적으로 큰 구속효과를 갖기 때문으로 사료된다.

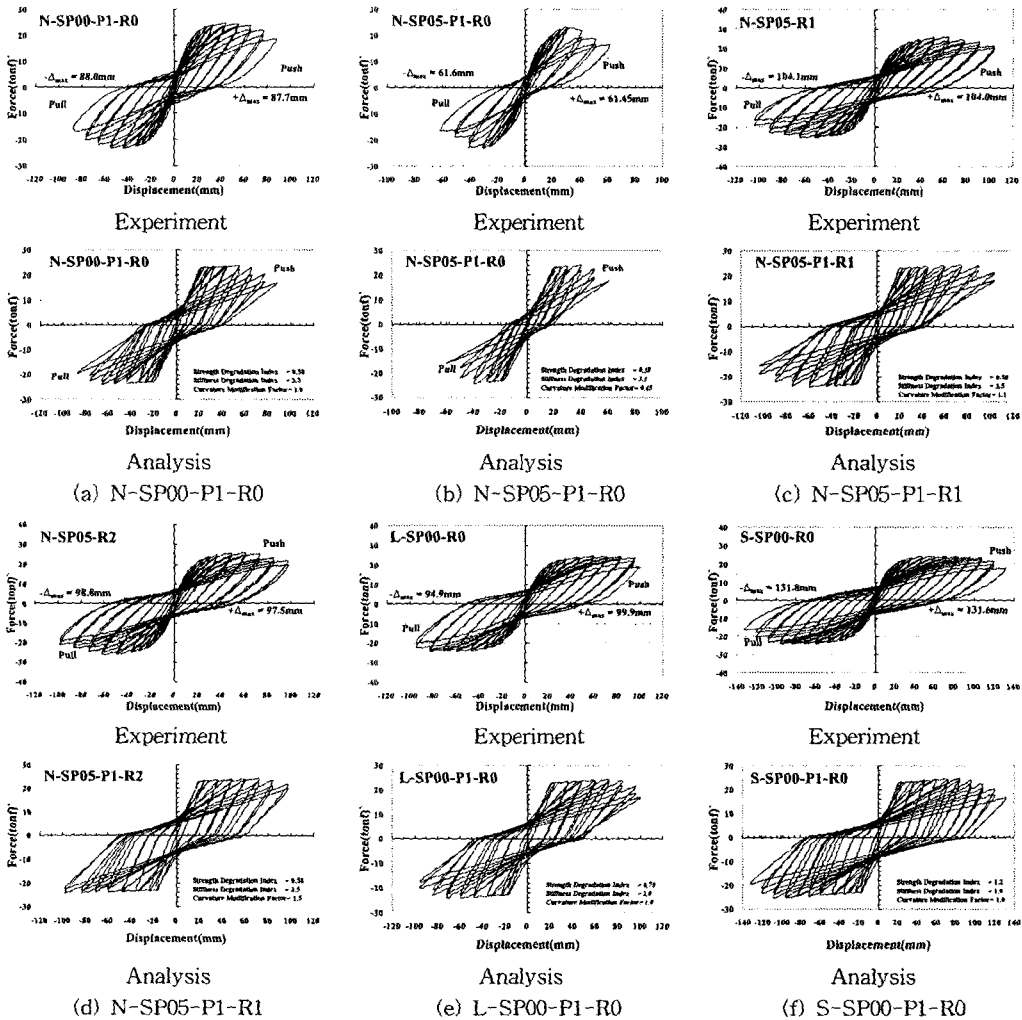


그림 9 실험 및 해석결과 비교

4.2 강도감소지수, 강성감소지수 및 곡률수정계수 평가

그림 10은 구속철근비에 따른 강도 및 강성감소지수의 변화를 나타내었다. 강도감소지수는 구속철근비가 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만, 강성감소지수의 경우에는 구속철근비가 증가할수록 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

그림 11은 주철근의 겹침이음 및 보강에 따른 곡률수정계수를 나타내었다. 겹침이음이 없는 시험체(N-SP00-P1-R0)를 기준($\gamma=1$)으로 하여 50% 주철근겹침이음시험체(N-SP05-P1-R0)는 0.45이며 보강된 시험체(N-SP05-P1-R1,2)는 각각 1.1과 1.5를 보이고 있다.

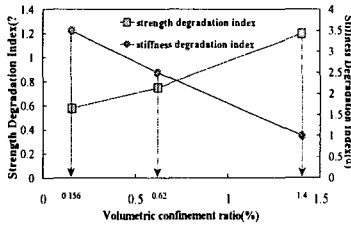


그림 10 강도 및 강성감소지수

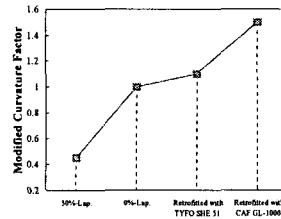


그림 11 곡률수정계수

5. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 해석적으로 예측하기 위하여 수정된 모멘트-곡률 관계를 제시하였다. 이러한 모멘트-곡률관계에 기초하여 해석적으로 철근콘크리트 교각에서 주철근의 겹침이음과 겹침이음된 시험체를 섬유로 보강한 시험체의 내진성능을 평가하였다.

수치해석 결과와 실험결과를 비교하여 강도감소 및 강성감소 지수를 제안하고 겹침이음과 보강에 따른 수정곡률계수(Modified curvature factor)를 제안하였다. 합리적인 강도감소지수는 해석대상모델의 연성능력을 예측 가능하게 하였으며 강성감소지수를 도입함으로써 해석대상모델의 pinching effect, 에너지흡수능력 및 잔류변형을 예측할 수 있었다.

본 연구에서는 형상비 4.0의 휨-전단파괴 모드의 시험체를 해석적으로 내진성능을 평가하였으며, 50%의 주철근이 겹침이음된 시험체와 이들 시험체를 섬유로 보강한 시험체에 대해서도 내진성능을 평가하였다. 해석결과는 실험결과와 내진성능면에서 상당히 일치하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서 제안한 강도 및 강성감소지수와 곡률수정계수를 이용하여 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 한국도로교설계기준, 2000.
2. 건설교통부, 내진설계기준연구, 1999.
3. 이대형, “원형 콘크리트교각의 내진 성능 평가에 관한 이론 및 실험적 연구”, 중앙대학교 박사학위논문, 1999.
4. 이대형, “주철근 겹침이음된 원형 RC교각의 내진성능 개선에 관한 연구”, 중앙대학교 석사학위논문, 2001.
5. Chung, Y. S., Meyer, C. and Shinozuka, M., “Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Members”, Technical Report NCEER-87-0022, October 9, 1987.
6. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., “Seismic Design and Retrofit of Bridges”, JOHN WILEY & SONS, Inc, 1996.