

# 주철근 겹침이음을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구

## Analytical Study on Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Columns with Lap Splices

김 태 훈<sup>\*</sup>      김 운 학<sup>\*\*</sup>      신 현 목<sup>\*\*\*</sup>      정 영 수<sup>\*\*\*\*</sup>  
Kim, Tae Hoon      Kim, Woon Hak      Shin, Hyun Mock      Chung, Young Soo

### ABSTRACT

Lap splices were located in the plastic hinge region of most bridge piers that were constructed before the adoption of the seismic design provision of Korea Highway Design Specification on 1992. Lap splicing is also permitted if hoops or spiral reinforcement are provided over the lap length in the current seismic design provision. But sudden brittle failure of lap splices may occur under inelastic cyclic loading. The purpose of this study is the analytical prediction of nonlinear hysteretic behavior and ductility capacity of reinforced concrete bridge piers with lap splices under cyclic loading. For this purpose, a nonlinear analysis program, RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology) is used. Lap spliced bar element is developed to predict behaviors of lap spliced bar. Maximum bar stress and slip of lap spliced bar is considered.

### 1. 서 론

큰 규모의 지진시 철근콘크리트 구조물은 대부분 비탄성 거동을 하게 되는데, 구조물의 붕괴를 방지하기 위해서는 적절한 강도와 연성을 확보해야 한다. 현재 세계 각국의 내진설계규정에서는 철근콘크리트 교각의 소성힌지구간에서 철근의 겹침이음을 금지하고 있는데 반해 국내에서는 1992년에 도입된 내진설계규정에 따라 내진설계가 이루어지고 있지만 소성힌지구간에서 철근의 겹침이음에 대한 금지규정은 없다. 따라서 시공상의 편의 등의 이유로 국내 현존 교각의 상당수가 주철근의 겹침이음이 이루어진 것으로 판단된다. 이러한 주철근이 겹침이음된 교각은 지진시 겹침이음부의 부착파괴로 인해서 구조물의 강도와 연성능력에 심각한 손실을 초래할 수 있다.

이 연구는 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동을 해석적으로 예측할 수 있

\* 정회원, 성균관대학교 건축·조경 및 토목공학 연구소 연구원, 공학박사

\*\* 정회원, 국립한경대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수, 공학박사

는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다. 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서, 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램<sup>1,2)</sup>에 겹침이음된 철근의 거동을 적절히 표현할 수 있는 겹침이음 철근요소(lap spliced bar element)를 추가하여 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 비선형 이력 거동을 예측하고자 한다.

## 2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

### 2.1 이차원 응력 하에서의 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생 후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다<sup>1,2)</sup>.

### 2.2 겹침이음된 철근의 재료모델

겹침이음된 철근은 실제로 두 개의 정착된 철근이 나란히 놓여져 철근의 강도가 서로 반대방향으로 발휘된다. 따라서 부착의 기본적인 메커니즘은 정착된 철근과 동일하지만 부착저항의 축대칭 성질은 겹침이음된 다른 철근이 있으므로 그 영향을 받게 된다. 겹침이음된 철근의 역학적 거동에 영향을 미치는 요인으로는 콘크리트의 압축강도와 피복두께, 횡방향철근의 직경과 간격, 그리고 겹침이음길이 등이 있다. 따라서 이러한 영향들을 고려하여 해석해야만 정확한 비선형 거동을 예측할 수 있다.

#### 2.2.1 철근의 변형률-슬립 관계

콘크리트에 매입된 철근에 하중이 작용하면 하중작용점에서 변위가 발생하게 되며 이러한 변위의 크기는 철근의 응력-변형률 관계와 부착응력-슬립 관계에 따라서 달라지게 된다. 겹침이음된 철근의 슬립량을 계산하기 위해서 Hawkins 등의 제안식<sup>3)</sup>을 적용하였다.

$$\text{철근 항복전, } S = \frac{F}{K} \quad (1)$$

$$\text{철근 항복후, } S = \frac{F_y}{K} + \frac{(F - F_y)}{K_s} \quad (2)$$

여기서,  $F$ 는 철근에 작용하는 하중,  $K$ 는  $(34600 d_b^2 + 339300) \sqrt{\frac{f'_c}{225}}$ ,  $d_b$ 는 철근의 직경,  $f'_c$ 은 콘크리트 압축강도,  $F_y$ 는 철근의 항복하중,  $K_s$ 는  $K \cdot \frac{E_{sh}}{E_s}$ ,  $E_{sh}$ 는 철근의 변형률 경화구간 탄성계수, 그리고  $E_s$ 는 철근의 탄성계수이다.

## 2.2.2 겹침이음된 철근의 최대부착력

겹침이음된 철근이 발휘할 수 있는 최대부착력을 계산하기 위해서 식 (3)과 같은 Darwin 등<sup>4)</sup>의 제안식을 적용하였다. 철근에 작용하는 하중이 계산된 최대부착력을 초과할 경우 겹침이음의 부착파괴가 발생하게 된다. 반복하중을 받는 경우에는 Hawkins 등<sup>5)</sup>에 의해 제안된 감소계수를 적용하였다.

$$\frac{T_b}{(f_c')^{\frac{1}{4}}} = [8.602l_d (c_m + 0.5 d_b) + 290.8 A_b](0.1 \frac{c_M}{c_m} + 0.9) + 303.9 t_r t_d \frac{NA_{tr}}{n} + 58.14 \quad (3)$$

여기서  $A_b$ 는 종방향철근의 단면적,  $f_c'$ 은 콘크리트 압축강도,  $d_b$ 는 종방향철근의 공칭직경,  $l_d$ 는 겹침이음길이,  $c_M$ 과  $c_m$ 은  $c_s$  또는  $c_b$ 의 최대값과 최소값( $c_M/c_m \leq 3.5$ ),  $c_s$ 는 ( $c_{si} + 0.635 cm$ )와  $c_{so}$  중 작은 값,  $c_{si}$ 는 겹침이음된 철근간 순간격의  $\frac{1}{2}$ ,  $c_b$ 는 겹침이음된 철근의 하단 덮개,  $c_{so}$ 는 철근의 측면 덮개,  $N$ 은  $l_d$  사이의 횡방향철근의 수,  $A_{tr}$ 은 할렬(splitting)이 일어나는 잠재적인 면을 가로지르는 횡방향철근의 단면적, 그리고  $t_r$ 과  $t_d$ 는 각각 환산리브면적( $R_r$ )과 철근직경의 효과를 고려하기 위한 변수이며 식 (4)와 식 (5)에 의해서 계산된다.

$$t_r = 9.6R_r + 0.28 \quad (4)$$

$$t_d = 0.72 \frac{d_b}{2.54} + 0.28 \quad (5)$$

## 3. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 탄성요소 그리고 경계면요소 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP<sup>6)</sup>에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)<sup>1,2)</sup>에 개발한 겹침이음 철근요소를 이식하여 사용하였다.

## 4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체<sup>7)</sup>에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 실험과 비교·분석하였다. 이 실험체는 내진설계규정이 도입된 1992년 이전에 시공된 고속도로상의 기존 교각을 대상으로 제원을 조사하여 교각직경, 종방향철근지름 및 갯수, 종방향철근비, 횡방향철근간격 등의 대표값으로 제작되었다.

실험체의 28일 콘크리트 압축강도는 평균  $253 kgf/cm^2$ 이며, 주철근과 띠철근은 각각 SD30인 D19, D10의 상용철근을 사용하였다. 각 철근들의 인장시험결과 평균항복강도는 각각  $3500 kgf/cm^2$ ,  $3800 kgf/cm^2$ 이었다. 실험체의 주요 제원은 Table 1과 같다.

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 원형 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하

도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다<sup>1,2)</sup>. 또한 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 철근콘크리트요소 71개, 경계면요소 5개, 집중하중이 작용하는 부분의 파괴를 방지하기 위한 탄성요소 2개, 그리고 접침이음 철근요소 5개로 총 83개의 요소로 분할하였다. 횡방향 철근의 구속효과는 종방향철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델을 채택하였다<sup>1,2)</sup>.

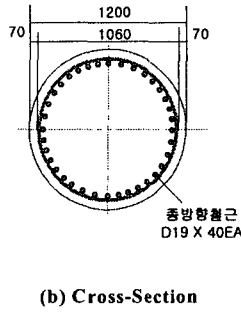
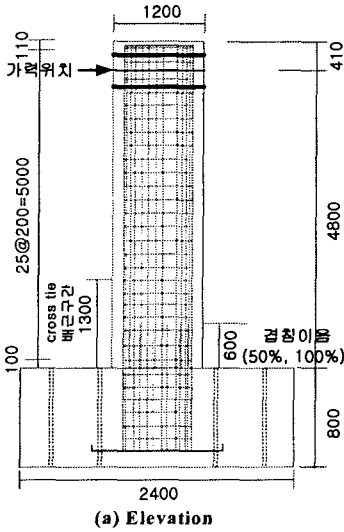


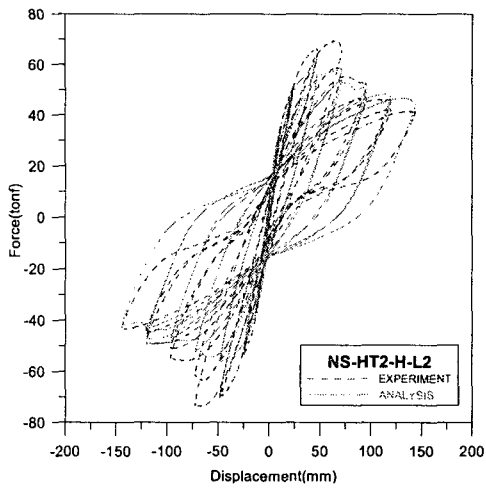
Fig. 2 Detail of Tie

Fig. 1 Dimension of Specimen (unit : mm)

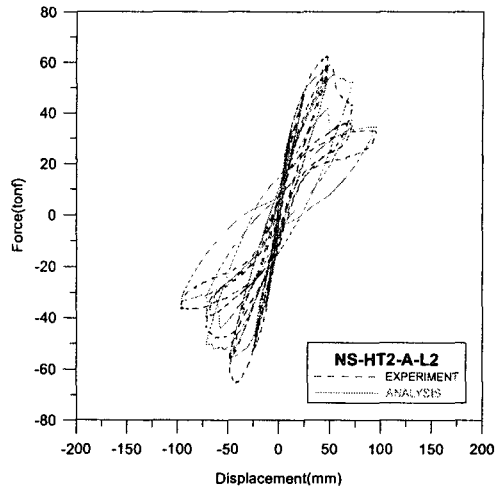
Table 1 Detail of Specimen

구분	주철근	띠철근	띠철근간격 (cm)	축하중 (tonf)	교각 직경 (cm)	교각 높이 (cm)	접침이음 길이 (cm)	접침이음 (%)
NS-HT2-H-L2	40@D19	D10	PHR: 20 NPHR: 20	190	120	480	60	50
NS-HT2-A-L2								100
NS-HT4-H-L2								50
NS-HT4-A-L2								100

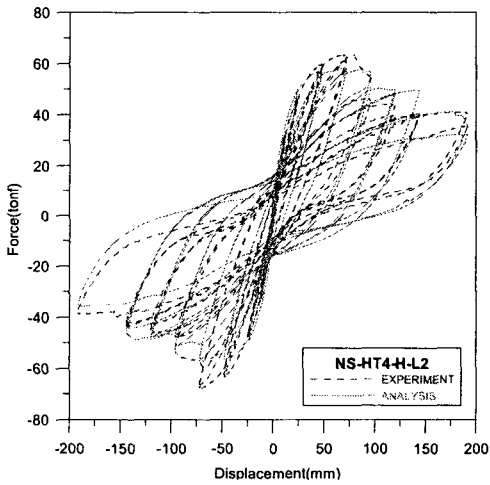
이 실험체에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 해석결과로부터 접침이음부의 부착파괴 등의 비선형 거동특성을 비교적 정확하게 추적함을 알 수 있다. 그리고 이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 Table 2에 정리하였다. 실험에 의한 변위연성도는 Paulay & Priestly의 방법<sup>8)</sup>으로 평가하였으며, 극한변위는 횡방향하중이 최대횡방향하중의 85%로 저하되었을 때의 횡방향하중 재하점의 수평변위로 정의하였다. 이 표에서 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 직접적인 방법<sup>1,2)</sup>으로 평가하였다. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.



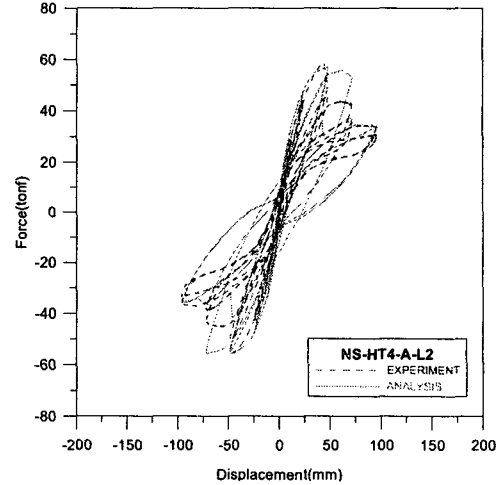
(a) NS-HT2-H-L2



(b) NS-HT2-A-L2



(c) NS-HT4-H-L2



(d) NS-HT4-A-L2

Fig. 3 Load-displacement curve

Table 2 Comparison of experiment with analysis

Specimen	Experiment				Analysis				(1) / (5)	(2) / (6)	(3) / (7)	(4) / (8)
	$V_{max}$ (tonf) (1)	$\delta_y$ (mm) (2)	$\delta_u$ (mm) (3)	$\mu$ (4)	$V_{max}$ (tonf) (5)	$\delta_y$ (mm) (6)	$\delta_u$ (mm) (7)	$\mu$ (8)				
NS-HT2-A-L2	62.42	29.6	59.0	2.0	56.63	38.0	44.0	1.2	1.10	0.78	1.34	1.73
NS-HT2-H-L2	69.57	32.1	84.6	2.6	58.33	20.0	60.0	3.0	1.19	1.61	1.41	0.87
NS-HT4-A-L2	58.70	30.5	59.2	1.9	56.99	36.0	46.0	1.3	1.03	0.85	1.29	1.49
NS-HT4-H-L2	63.54	33.2	98.5	3.0	58.63	20.0	70.0	3.5	1.08	1.66	1.41	0.86

## 5. 결론

이 연구에서 제안한 해석방법을 이용하여 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각을 해석한 결과를 실험 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이 해석모델에 의하여 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 거동특성을 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

2) 겹침이음된 철근의 최대부착력, 철근의 슬립 및 반복하중시의 감소계수 등을 적용한 겹침이음 철근요소는 겹침이음된 철근의 거동 특성을 적절하게 표현하는 것으로 판단된다.

3) 실험 및 해석결과에서 나타난 것처럼 주철근의 겹침이음에 의해 철근콘크리트 교각의 연성능력이 감소하게 되며, 주철근이 100% 겹침이음된 실험체에서는 겹침이음부의 부착파괴가 발생한 이후 교각의 휨내력이 급격히 감소하므로 주철근을 겹침이음할 경우 겹침이음길이, 횡방향철근량 및 간격 등에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4) 주철근 겹침이음된 철근콘크리트 교각에 대한 보수·보강의 판단 및 보강방법 선정 등에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M. (2002), "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2002, < Accepted >
2. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 박사학위 논문, 성균관대학교, 2003.
3. Hawkins, N. M., and Lin, I., "Bond Characteristics of Reinforcing Bars for Seismic Loadings," *Proceedings, Third Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 2, Montreal, Canada, June. 1979, pp. 1225-1234.
4. Darwin, D., and Zuo, J., "Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 4, 2000, pp. 630-641.
5. Hawkins, N. M., Lin, I., and Ueda, T., "Anchorage of Reinforcing Bars for Seismic Forces," *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 5, 1987, pp. 407-418.
6. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2*, 2000.
7. 이대형, 박진영, 정영수, 조대연, 이재훈, "주철근 겹이음에 따른 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가," 한국지진공학회 추계 학술발표회 논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 187-193
8. Park, R., "Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing," *Proc. of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. VII, Balkema, Rotterdam, 1998, pp. 605-616.