

철근의 겹침이음을 고려한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Bridge Piers with Lap Splices

김 태 훈*
Kim, Tae Hoon

박 현 용**
Park, Hyun Yong

김 병 석***
Kim, Byung Seok

신 현 목****
Shin, Hyun Mook

국문요약

1992년 도로교 설계기준의 내진설계규정이 도입되기 이전에 건설된 대부분의 교각은 소성힌지구간에서 주철근의 겹침이음이 이루어졌다. 그러나 비탄성 반복하중 하에서 겹침이음부의 갑작스런 취성파괴가 발생할 수 있다. 이 연구는 반복하중을 받는 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동과 연성능력을 해석적으로 파악하는데 그 목적이 있다. 이를 위해서 비선형 해석프로그램인 RCAHEST가 사용되었으며 겹침이음된 철근의 거동을 예측하기 위해서 겹침이음 철근요소를 개발하였다. 또한 겹침이음된 철근의 최대 철근응력과 슬립이 고려되었다. 이 연구에서는 주철근의 겹침이음을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

주요어 : 겹침이음, 철근콘크리트 교각, 이력거동, 연성능력

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. But sudden brittle failure of lap splices may occur under inelastic cyclic loading. The purpose of this study is to analytically predict 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 also considered. The proposed numerical method for seismic performance evaluation of reinforced concrete bridge piers with lap splices is verified by comparison with reliable experimental results.

Key words : lap splices, reinforced concrete bridge piers, hysteretic behavior, ductility capacity

1. 서 론

최근 터키, 대만 등 세계적으로 많은 강진이 발생하여 인적, 물적인 피해가 심각하며 국내에서도 지진관측 횟수가 예년에 비해 증가하여 시설물에 대한 내진성능 확보의 중요성이 증대되고 있다.

큰 규모의 지진시 철근콘크리트 구조물은 대부분 비탄성 거동을 하게 되는데, 구조물의 붕괴를 방지하기 위해서는 적절한 강도와 연성을 확보해야 한다. 현재 세계 각국의 내진 설계규정에서는 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 인해서 국내 현존 교각의 상당수가 주철근의 겹침이음이 이루어진 것으로 판단된다. 이러한 주철근이 겹침이음된 교각은 지진시 겹침이음부의 부착파괴로 인해서 구조물의 강도와 연성능력에 심

각한 손실을 초래할 수 있다.

반복하중을 받는 겹침이음의 거동에 대한 실험적인 연구는 여러 연구자에 의해 수행되어왔다. Fagundo 등⁽¹⁾은 보 실험체에 대해 모멘트가 일정한 구역에서 하중이력과 횡방향 구속효과가 겹침이음의 강도와 연성에 미치는 영향을 연구하였으며, Tocci 등⁽²⁾과 Sivakumar 등⁽³⁾은 겹침이음을 포함한 보와 기둥 실험체에 대한 실험을 수행하였으며, 실험을 통하여 반복하중하에서 부착저항력의 크기, 횡방향철근, 덮개(cover) 및 겹침이음된 철근간의 간격 등이 겹침이음의 거동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Darwin 등⁽⁴⁾ 등은 횡방향철근, 콘크리트의 압축강도, 겹침이음길이 및 철근의 직경 등을 고려하여 겹침이음된 철근이 발휘할 수 있는 최대부착강도에 대한 연구를 수행하였다. Paulay⁽⁵⁾와 Lin⁽⁶⁾은 반복하중을 받는 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 거동에 대하여 실험적인 연구를 수행하였다. 국내에서는 김병석 등⁽⁷⁾과 정영수 등⁽⁸⁾에 의해서 실험적인 연구가 수행되었다.

이 연구는 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다. 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지

* 정회원 · 성균관대학교 건축·조경 및 토목공학 연구소 연구원, 공학박사
(대표저자 : neopilot@skku.edu)

** (주)유신코퍼레이션 구조2부, 공학석사

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

**** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2003년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 2. 19 / 심사종료일 : 2003. 4. 28)

배되기 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 유효요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽⁹⁾에 겹침이음된 철근의 거동을 적절히 표현할 수 있는 겹침이음 철근요소(lap spliced bar element)를 추가하여 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동을 예측하고자 한다.

2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

2.1 이차원 응력 하에서의 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^{(9),(11)}을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열발생후의 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.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열 모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나, 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석모

델⁽¹²⁾을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다.

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이 연구에서는 철근과 콘크리트의 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식⁽¹³⁾을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식⁽¹⁴⁾을 수정하여 제안하였다.

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.

이 연구에서는 주철근이 겹침이음된 철근 콘크리트 교각의 거동을 예측하기 위하여 겹침이음된 철근의 슬립, 부착파괴, 그리고 반복하중을 받는 경우의 최대부착력의 감소계수 등을 고려하였다.

2.2.1 철근변형률-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⁽¹⁵⁾을 적용하였다.

$$\text{철근 항복전, } S = \frac{F}{K} \tag{1}$$

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

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 경화율, 그리고 E_s 는 철근의 탄성계수이다.

2.2.2 겹침이음된 철근의 최대부착력

주철근이 겹침이음된 교각에서 겹침이음 파괴는 두가지 형태로 일어날 수 있다. 첫 번째는 최외단 철근을 따라서 할렬균열이 발생하여 파괴될 수 있으며, 두 번째는 겹침이음된 철근 사이에서 균열이 진행되어 하중 전달이 이루어질 수 없게 되어 파괴될 수 있다. 겹침이음의 부착파괴형태는 단면의 형상에 따라서 달라지게 된다. Darwin 등은 철근이 횡방향 철근에 의해 구속된 166개의 직사각형 단면을 가진 보 실험체에 대한 파라미터해석을 통하여 단조재하된 직사각형 단면을 가진 부재에서 겹침이음된 철근의 부착파괴에 대한 최대부착력의 계산식⁽⁴⁾을 제안하였다.

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

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 철근 간 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, t_r 은 $9.6R_r + 0.28$ 이고 t_d 는 $0.72 \frac{d_b}{2.54} + 0.28$ 이다.

식 (3)은 단조재하된 직사각형 단면을 가진 보의 실험으로부터 유도되었으며, Fig. 1에 나타난 겹침이음면 전단파괴(splice plane shearing)와 덮개 할렬파괴(cover splitting failure)를 적절하게 예측할 수 있다. Fig. 2에 나타난 것처럼 원형 단면을 가진 교각에서 부착파괴형태는 직사각형 단면의 교각에서와 유사하므로 식 (3)을 적용하기 위해 c_{si} , c_m , C_M , c_b 등의 변수를 식 (4)와 같이 수정하여 적용하였다.

$$c_b = c \text{ and } c_s = 0.5 S_c + 0.635 cm \quad (4)$$

여기서, c 는 겹침이음된 철근 중 외측철근의 피복두께이고, 그리고 S_c 는 외측철근의 원주방향의 순간격이다.

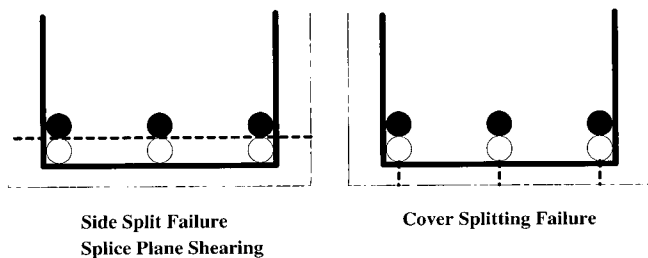


Fig. 1 Splice Failure Modes Covered by Eq. (3)

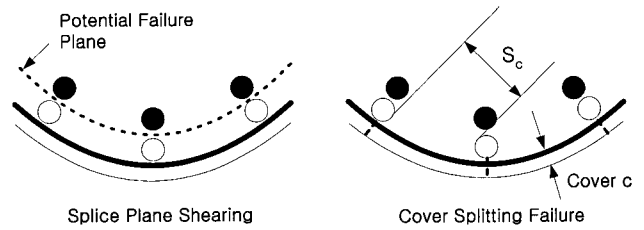


Fig. 2 Splice Failure Modes Possible for Circular Columns

반복하중을 받는 경우에는 식 (3)에서 계산된 철근의 최대부착력은 감소한다. 반복하중을 받는 교각의 종방향 철근에 의해 발휘되는 최대부착응력의 감소는 사이클(cycle)의 최대하중(peak load)에서 철근응력이 단조재하하에서 부착파괴가 일어나는 최대철근응력의 75%를 초과할 경우에 나타난다. Hawkins 등의 제안식⁽¹⁶⁾에서 최대부착응력의 감소계수(γ)를 식 (5)와 같이 0.65까지 선형적으로 감소하도록 수정하여 적용하였다.

$$\gamma = 0.9 - \frac{(S - 0.75 S_0)}{S_0} \geq 0.65 \quad (5)$$

여기서, $S_0 = 0.01679 \left(\frac{f_c'}{d_b} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{32.66}{f_c' d_b}$, S 는 슬립(slip), f_c' 은 콘크리트 압축강도, d_b 는 종방향철근의 공칭직경, 그리고 $(S - 0.75 S_0)$ 항은 S 가 $0.75 S_0$ 를 초과하지 않으면 적용되지 않는다.

3. 유한요소 정식화 및 비선형 유한요소해석 프로그램

3.1 겹침이음 철근요소

이 연구에서는 유한요소 정식화가 간편한 트러스요소를 사용하여 겹침이음된 철근의 최대부착력과 슬립 등을 고려할 수 있는 겹침이음 철근요소를 개발하였다. Fig. 3과 같이 겹침이음된 철근의 변형률은 철근의 변형률과 철근의 슬립으로 인한 변형률의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_s + \epsilon_{slip} \quad (6)$$

여기서, ϵ_s 는 철근의 변형률, 그리고 ϵ_{slip} 은 $2slip/l_d$ 이다.

트러스요소의 응력-변형률 관계로부터 겹침이음된 철근의 응력-변형률 관계는 식 (7)과 같다.

$$\{\sigma_s\} = [D] \{\epsilon_s\} = [D] \{\epsilon - \epsilon_{slip}\} \quad (7)$$

여기서, $\{\sigma_s\}$ 는 철근의 응력, $[D]$ 는 철근의 탄성계수, $\{\epsilon_s\}$

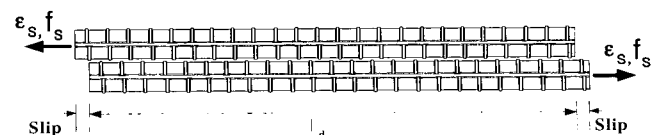


Fig. 3 Lap spliced bar

는 철근의 변형률, 그리고 $\{\epsilon\}$ 은 식 (6)으로부터 구해지는 겹침이음된 철근의 변형률이다.

3.2 유한요소 프로그램의 작성

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소⁽⁹⁾⁽¹¹⁾, 그리고 경계면요소⁽⁹⁾⁽¹¹⁾ 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹⁷⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)⁽⁹⁾에 개발한 겹침이음 철근요소(lap spliced bar element)를 이식하여 사용하였다.

4. 해석모델의 타당성 검증 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 4에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체⁽⁷⁾에 대한 해석을 수행하고 결과를 실험과 비교하였다. 이 실험체는 비내진으로 설계된 경기도 가평군의 국도상에 위치한 창촌교를 대상모델로 크기와 철근 배근 등을 실제 교각과 동일하게 적용하였으며 소성힌지구간에서 각각 0%, 50%, 100% 주철근의 겹침이음이 이루어졌다. 이 실험은 구조물의 하중-이력, 비탄성 에너지 소산능력과 파괴상태를 비교·평가하기에 가장 경제적이고 유용한 실험 기법으로 알려진 준정적 실험(quasi-static test)으로 수행되었다.

4.1 선정된 실험체의 제원⁽⁷⁾

실험체의 단면은 직경 120cm의 원형이며 기초부에서 재하점까지의 높이가 320cm인 원형단면교각으로서 교각의 형상비는 휨-전단 복합거동이 예상되는 2.67이다. 실험체의 주요 제원은 Table 1에 나타난 바와 같다. 겹침이음길이는 실

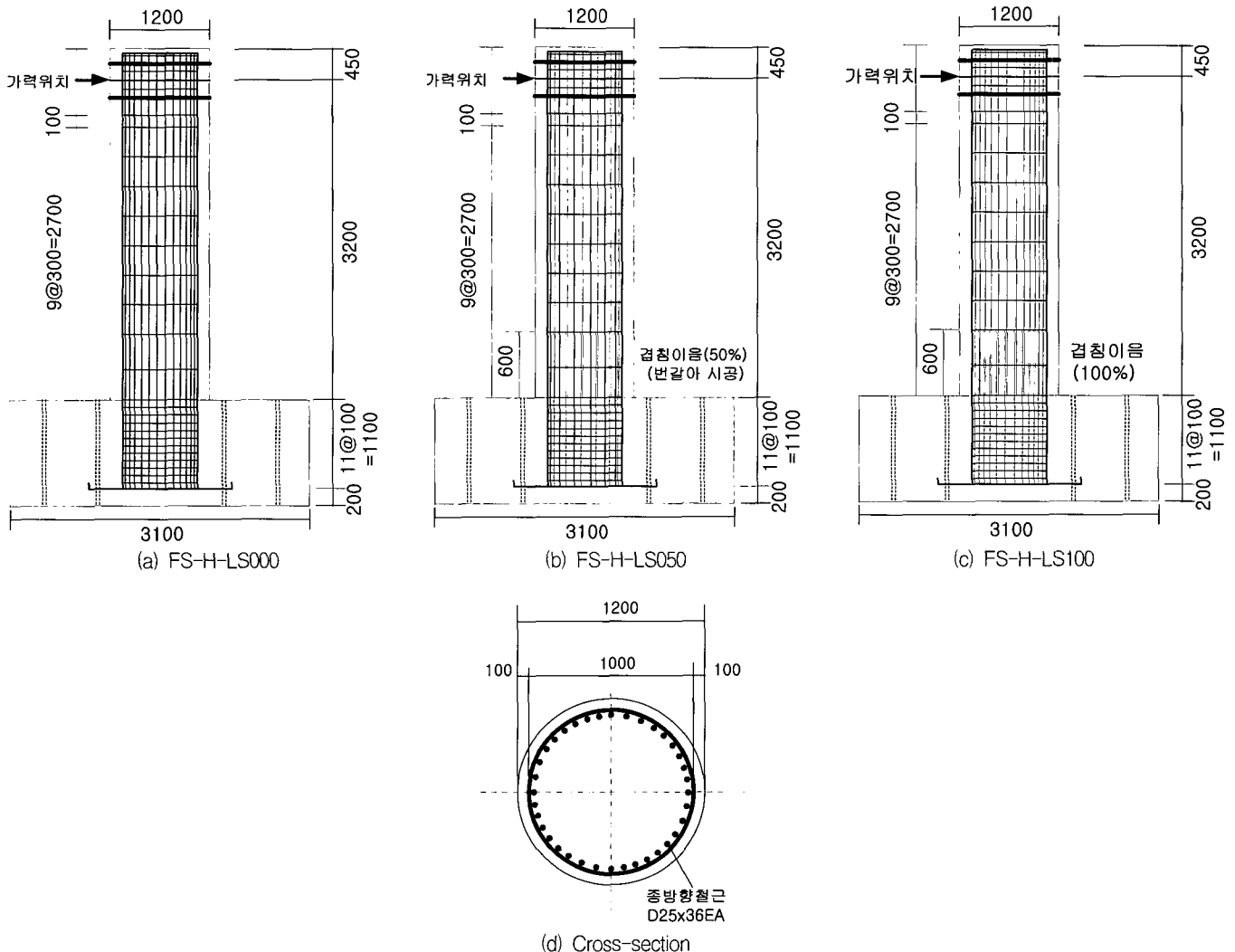


Fig. 4 Dimension of specimen

Table 1 Test specimens

Specimen		FS-H-LS000	FS-H-LS050	FS-H-LS100
Diameter of the cross section(cm)		120(Circle)		
Effective height(cm)		320		
Aspect ratio		2.67		
Main reinforcement	Material	SD30A D25		
	Yielding stress(kgf/cm ²)	3378		
	Reinforcement ratio ρ_l (%)	1.6		
Hoop reinforcement	Material	SD30A D13		
	Yielding stress(kgf/cm ²)	3326		
	Volumetric ratio ρ_w (%)	0.34		
Strength of concrete(kgf/cm ²)		250		
Axial force(tonf)		200 (0.07 $f'_c A_g$)		

협대상모델인 창촌교의 교각은 내진설계가 되어 있지 않으므로 압축부재의 철근 겹침이음기준에 의해 계산되었다. 겹침이음된 주철근 중 기초 상부에서 교각 상단을 향하여 설치되는 철근은 시공 당시의 편의성을 고려하여 기초부 상면에서 시작되는 것으로 가정하였으며, 겹침이음의 중심위치는 기초 상면으로부터 약 31cm위치(약 0.26D)에 설치하였다.

축하중은 압축력 350tonf 용량의 actuator를 사용하여 200tonf를 일정하게 재하하였다. 수평하중은 3500kN actuator를 이용하여 교각 실험체의 높이에 대한 수평방향의 drift level로 하중을 재하하는 방법을 사용하였으며, 각 단계별로 2회씩 재하하였다. Fig. 5에서와 같이 drift level의 증가치를 0.25% → 0.5% → 1.0%...의 순서로 파괴시까지 0.25%씩 증가시켜 실험체의 거동과 파괴양상을 관찰하였다. 실험은 수평력이 최대내력보다 저하되고 종방향철근의 파단 등의 손상이 생길 때까지 수행했다.

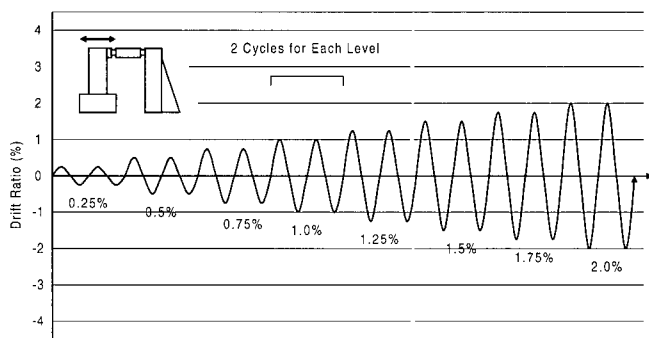


Fig. 5 Drift level in quasi-static test

4.2 유한요소해석을 위한 요소분할

실험체의 유한요소해석을 위해서 원형단면을 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트가 같도록 등가의 직사각형단면으로 변환하여 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 겹침이음되지 않은 실험체는 Fig. 6과

같이 철근콘크리트요소 61개, 경계면요소 5개 그리고 탄성요소 2개로 총 68개의 요소로 분할하였으며, 주철근이 50% 겹침이음된 실험체와 100% 겹침이음된 실험체는 Fig. 7과 같이 철근콘크리트요소 61개, 경계면요소 5개, 탄성요소 2개 그리고 겹침이음 철근요소 5개로 총 73개의 요소로 분할하였다.

철근콘크리트요소의 경우에는 8절점을 갖는 등매개요소로서 3점 가우스적분을 적용하였고, 하중이 재하되는 부위에는 실험체와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의

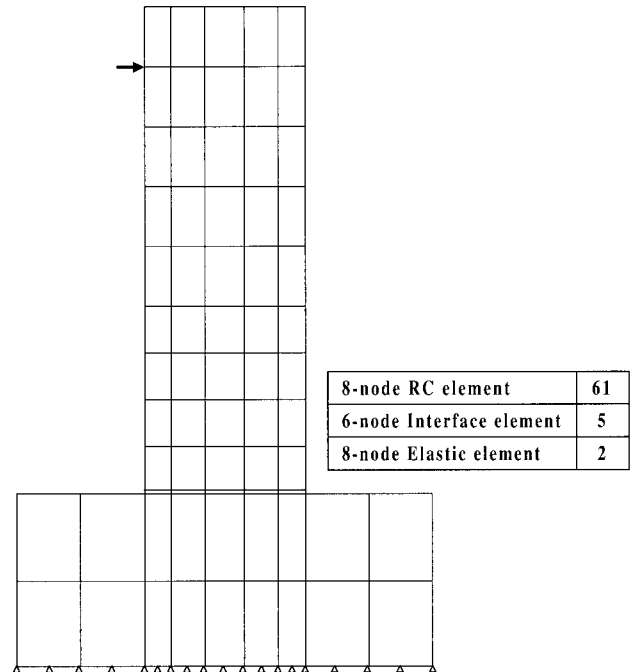


Fig. 6 Finite element mesh used for analysis(FS-H-LS000)

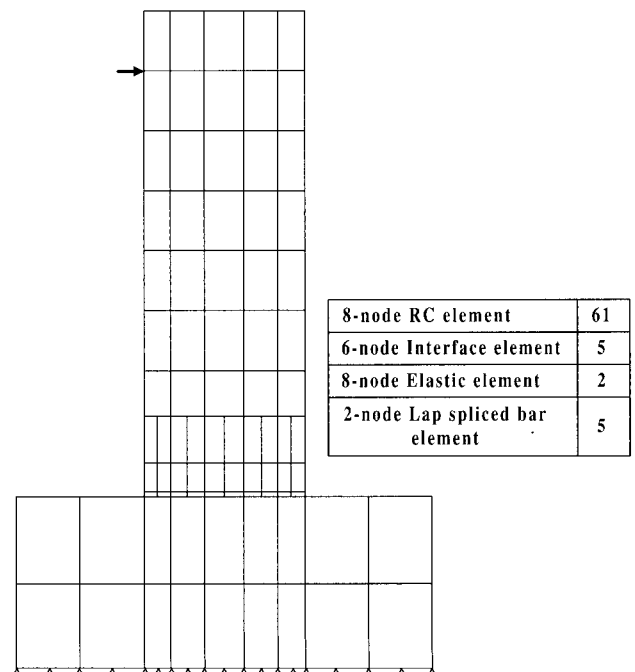


Fig. 7 Finite element mesh used for analysis(FS-H-LS050 and FS-H-LS100)

접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6 절점 경계면 요소를 사용하였으며 요소의 길이방향으로 3개의 적분점에 대해서 변형률과 응력을 산정하도록 하였다.

4.3 실험 및 해석 결과

이 연구에서 개발한 겹침이음 철근요소를 추가한 프로그램을 통한 유한요소 해석과 실험결과에 의한 하중-변위 관계를 Fig. 8~Fig. 10에 나타내었다. 실험에서 교각 하단부에서 주철근이 겹침이음되지 않은 실험체(FS-H-LS000)는 횡방향 철근이 비내진 상세임에도 불구하고 상당한 연성이 발휘되어 안정적인 하중-변위 이력곡선을 보이고 있다. 이에 반해서 50%의 주철근이 겹침이음된 실험체(FS-H-LS050)는 겹침이음부의 부착파괴로 인해서 휨에 대한 내력이 현저히 저하되었으며, 특히 100%의 주철근이 겹침이음된 실험체(FS-H-LS100)는 주철근 겹침이음부의 부착파괴 발생 이후에 휨에 대한 내력이 급격히 저하되었다.

Fig. 8로부터 해석결과도 교각 하단부에서 주철근이 겹침이음되지 않은 실험체(FS-H-LS000)는 상당한 연성이 발휘되어 안정적인 하중-변위 이력곡선을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 9 및 Fig. 10으로부터 주철근이 겹침이음된 두 실험체(FS-H-LS050 및 FS-H-LS100)의 해석결과는 겹침이음부의 부착파괴가 실험과 동일한 drift level에서 발생하고 있으며, 주철근이 겹침이음된 교각실험체의 최대 수평내하력 및 부착파괴 후의 내력 저하 현상을 포함한 전반적인 비선형 거동을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

4.4 검증 및 고찰

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 Table 2에 정리하였다. 실험에 의한 변위연성

도는 Paulay & Priestly의 방법⁽¹⁸⁾으로 평가하였으며, 극한변위는 횡방향하중이 최대횡방향하중의 85%로 저하되었을 때의 횡방향하중 재하점의 수평변위로 정의하였다. 이 표에서 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 직접적인 방법으로 평가하였다. 즉, 항복변위는 시스템 내의 위험단면의 가우스 적분점에서의 철근의 평균응력이 항복응력에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로, 극한변위는 위험단면의 가우스 적분점에서의 콘크리트 또는 철근의 변형률이 각각의 파괴기준 변형률에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로 정하였다. 주철근이 100% 겹침이음된 실험체(FS-H-LS100)는 겹침이음된 주철근의 평균응력이 항복응력에 도달하기 전에 겹침이음부의 부착파괴가 발생하여 변위연성도 평가에서 제외하였다. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험 결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

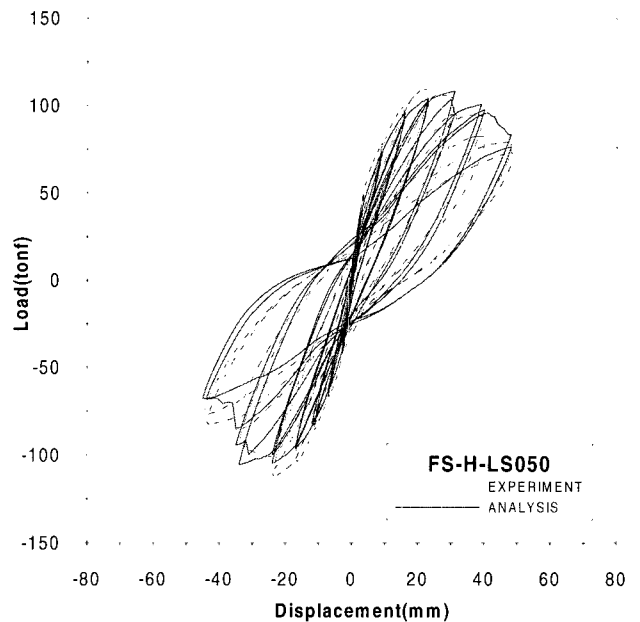


Fig. 9 Load-displacement curve for FS-H-LS050

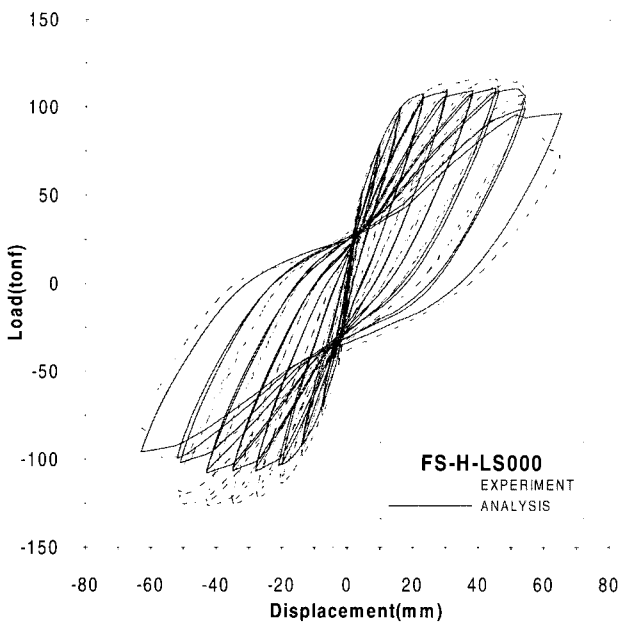


Fig. 8 Load-displacement curve for FS-H-LS000

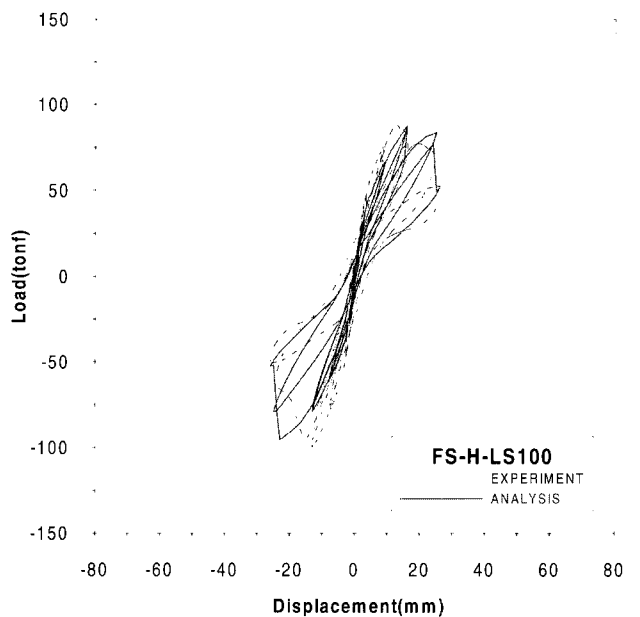


Fig. 10 Load-displacement curve for FS-H-LS100

Table 2 Comparison of test with analysis

Specimen		Yield displacement (mm)	Ultimate displacement (mm)	Ultimate force (tonf)	Displacement Ductility ratio
FS-H-LS000	Experiment(1)	16.5	58.0	126.5	3.5
	Analysis(2)	16.0	53.0	110.5	3.3
	(1)/(2)	1.03	1.09	1.14	1.06
FS-H-LS050	Experiment(1)	13.5	40.0	109.6	3.0
	Analysis(2)	11.0	31.0	108.4	2.8
	(1)/(2)	1.23	1.29	1.01	1.07
FS-H-LS100	Experiment(1)	8.6	21.8	88.6	2.5
	Analysis(2)	.	15.0	87.5	.
	(1)/(2)	.	1.45	1.01	.

(주) FS-H-LS100의 해석결과는 주철근이 항복하기 전에 부차파괴가 발생하였음.

5. 결 론

이 연구를 통하여 횡방향의 반복하중을 받는 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동 및 연성능력을 해석적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 철근콘크리트의 재료적인 비선형 모델을 적용한 유한요소프로그램(RCAHEST)에 겹침이음 철근요소를 추가하여 반복하중을 받는 교각 실험체에 대한 비선형해석을 수행하였으며, 실험결과와 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근과 콘크리트의 단면적, 철근비, 그리고 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트가 동일한 등가환산단면을 이용하고 2차원 평면응력요소, 탄소성 요소, 부재의 경계면에서 불연속변형을 고려한 경계면 요소 그리고 겹침이음 철근요소 등을 사용하여 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각에 대한 비선형해석을 수행한 결과, 제안한 해석방법과 모델이 철근콘크리트 교각의 전반적인 거동특성을 적절하게 예측하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 겹침이음된 철근의 최대부차력, 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 부차파괴가 발생한 이후 교각의 휨내력이 급격히 감소하므로 주철근을 겹침이음할 경우 겹침이음길이, 횡방향철근량 및 간격 등에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 이 연구에서 제안한 유한요소해석에 의해서 콘크리트의 압축강도와 피복두께, 횡방향철근과 겹침이음비 등의 변화에 따른 주철근이 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 거동을 예측할 수 있게 되었으며, 내진성능평가, 내진보강 및 설계 검토 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.
- 5) 이 연구에서는 반복하중을 받는 원형 철근 콘크리트 교

각에 대한 해석을 수행하였으나, 제안된 해석 방법에 의해서 직사각형 단면의 철근콘크리트 교각 구조물이나 철근콘크리트 보 등의 해석에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. Fagundo, F., Gergely, P., and White, R. N., "The Behavior of Lapped Splices in R/C Beams Subjected to Repeated Loads," Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, 1979.
2. Tocci, A. D., Gergely, P., and White, R. N., "The Behavior and Strength of Lapped Splices in R/C Beams Subjected to Cyclic Loading," Report No. 81-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, 1981.
3. Sivakumar, V. E., Gergely, P., and White, R. N., "Behavior and Design of R/C 'Column-Type' Lapped Splices under Inelastic Cyclic Loading," Report No. 82-11, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, 1982.
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. Paulay, T., "Lapped Splices in Earthquake-Resisting Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 79, No. 6, 1982, pp. 458-469.
6. Lin, Y., "Seismic Behavior of Bridge Pier Column Lap

- Splices," Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1996.
7. 김병석, 김영진, 정연주, 강재운, 박성용, 곽임중, 조정래, 조창백, "교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석 프로그램 개발", 한국건설기술연구원 연구보고서, 2001
 8. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, "주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 대한토목학회 논문집, 제22권, 5-A호, 2002, pp. 187-193
 9. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 113-124.
 10. 김태훈, 김운학, 신현목, "철근콘크리트 교각의 지진손상 평가 I: 이론 및 정식화", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 3호, 2002, pp. 31-40.
 11. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
 12. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.
 13. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, K., "Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.
 14. Kakuta, Y., Okamura, H., and Kohno, M., "New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan," IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures, Lausanne, 1982, pp. 51-58.
 15. 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.
 16. 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.
 17. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual*, Vol. 1 and Vol. 2, 2000.
 18. 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.