

---

# 지진시 철근콘크리트 기둥-기초 접합부의 불연속 변위에 관한 해석적 연구

Analytical Study on Discontinuous Displacement in  
Reinforced Concrete Column-Footing Joint under Earthquake



김태훈\*

Kim, Tae-Hoon



신현목\*\*

Shin, Hyun-Mock

---

## ABSTRACT

This paper presents an analytical prediction of the inelastic behavior of discontinuous displacement in reinforced concrete column-footing joint under earthquake. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The smeared crack approach is incorporated. In boundary plane at which each member with different thickness is connected, local discontinuous deformation due to the abrupt change in their stiffness can be taken into account by introducing interface element. The proposed numerical method for hysteretic behavior of discontinuous displacement in reinforced concrete column-footing joint will be verified by comparison with reliable experimental results.

Keywords : discontinuous displacement, column-footing joint, interface element, hysteretic behavior

---

\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정

\*\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2001년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다

## 1. 서 론

지진시에 대비한 철근콘크리트 구조물의 내진 성능평가를 위해서는 비탄성 범위에서 반복 주기 하중을 받는 부재의 특성, 즉 부재의 연성, 강성 저하, 에너지의 소산능력 등을 파악하여야 하며, 이를 위해서는 부재의 이력 거동 특성을 정확히 규명할 필요가 있다.

철근콘크리트 기둥구조 등과 같은 구조물은 보, 기둥, 기초 등 서로 다른 종류의 부재들로 이루어져 있기 때문에 기둥과 기초부 등의 접합부에는 정착슬립(anchorage slip) 등의 불연속 변위가 발생하게 된다. 이러한 변위는 구조물의 강도에는 큰 영향을 미치지 않지만 구조물 전체 변위의 약 30%를 차지하고 있으며 구조물의 강성 저하와 에너지 소산능력의 감소현상 등에 직접적인 영향을 끼치므로 이를 무시할 수 없다.<sup>(1)</sup>

즉, 철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 해석적으로 수행하기 위해서는 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 정확히 예측할 수 있는 재료모델 뿐만 아니라 기능이 서로 다른 부재 사이에 발생하는 철근의 정착슬립 등의 불연속 변위를 예측할 수 있는 경계면요소(interface element)의 개발이 필요하게 된다.

이 연구에서는 철근콘크리트 부재의 역학거동의 해석적인 예측에 대해서는 저자들에 의하여 기 보고된 논문<sup>(2,3)</sup>의 비선형 재료모델을 그대로 인용하고 기능이 서로 다른 부재 사이에 발생하는 불연속 변위의 해석적인 예측을 위한 경계면요소의 모델은 반복하중을 받는 철근 콘크리트 부재의 역학거동에 관한 연구<sup>(4)</sup>에 사용된 경계면요소를 수정·보완함으로써 철근콘크리트 기둥-기초 접합부의 불연속 변위의 비선형 이력거동을 예측하기 위한 해석기법을 제시하고자 한다.

## 2. 철근콘크리트 비선형 재료모델

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타 구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으

로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.<sup>(2,3)</sup>

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.<sup>(2,3)</sup>

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 철근의 응력은 항복 응력보다 작기 때문에, 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않으며 즉시 변형을 경화현상을 보인다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 일정한 변형을 경화율을 갖는 것으로 저자 등이 제안한 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다.<sup>(2,3)</sup>

## 3. 경계면요소의 모델

철근콘크리트 부재중 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서는 단면강성이 급변함에 따라 철근의 정착슬립이나 접합면의 미끄러짐, 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속 변위가 집중하기 때문에 이를 해결하기 위한 경계면요소(interface element)를 도입할 필요가 있다.

### 3.1 경계면 직각방향에 대한 모델

#### 3.1.1 철근의 정착슬립(anchorage slip) 모델

기초로부터의 철근의 정착슬립에 관한 해석모델은 Shima 등이 제안하고 있는 정착길이가 긴 경우의 철근의 변형률-슬립(slip) 관계식<sup>(5)</sup>을 기본적으로 사용하였다.

$$\text{철근항복전, } s = \epsilon_s \cdot (2 + 3500 \cdot \epsilon_s) \quad (1)$$

철근항복후,

$$s = 0.0047 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y \quad (2)$$

여기서,  $s$ 는  $(\frac{Slip}{D})(\frac{f_c}{200})^{2/3}$ ,  $D$ 는 철근의 직경,  $f_c$ 는 콘크리트의 일축압축강도,  $\epsilon_s$ 는 철근의 변형률,  $f_u$ 는 철근의 인장강도,  $f_y$ 는 철근의 항복강도,  $\epsilon_{sh}$ 는 철근의 변형률 경화율이 시작될 때의 변형률 그리고  $s_y$ 는  $\epsilon_y \cdot (2 + 3500 \cdot \epsilon_y)$ 이다.

이 관계식은 정착길이가 비교적 긴 경우에 철근의 변형률-슬립 관계를 규명한 실험식이므로 철근의 축방향응력-부착응력과 관계식을 구할 필요가 없이 직접 경계면요소의 모델로 사용할 수 있는 장점이 있다.

반복하중을 받는 철근콘크리트 부재에는 높은 인장응력, 압축응력 및 전단응력을 번갈아 받는 경우가 일반적이므로 그러한 부분의 콘크리트는 손상을 입게 되며, 부착력의 저하가 발생한다. 이 연구에서는 Shima 등의 제안모델에 부착력의 저하구간을 설정하고 철근의 직경, 철근의 항복강도 및 콘크리트의 강도를 매개변수로 하여 많은 경우에 대한 해석결과로부터 수정 제안된 철근의 변형률-슬립(slip) 관계를 적용하였다(Fig. 1).

### 1) 재하시(Loading)

$$\text{철근항복전, } s = \epsilon_s \cdot (6 + 3500 \cdot \epsilon_s) \quad (3)$$

철근항복후,

$$s = 0.007 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y/2 + 0.06$$

$$s \leq 0.02 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y \quad (4)$$

여기서,  $s_y$ 는  $\epsilon_y \cdot (6 + 3500 \cdot \epsilon_y)$ 이다.

### 2) 제하및 재재하(Unloading and Reloading)

$$s = A \cdot (\epsilon_s - B)^2 + C \quad (5)$$

$$s = D \cdot (\epsilon_s - E)^2 + F \quad (6)$$

여기서,  $A$ 는  $-\frac{C}{B^2}$ ,  $B$ 는  $e_{max} + e_{res} + e_3$ ,

$C$ 는  $s_{max} + \frac{s_{max} \cdot e_3^2}{(e_{max} + e_3)^2 - e_3^2}$ ,  $e_{max}$ 는

철근의 최대탄성변형률,  $e_{res}$ 는 철근의 잔류변형률,

$s_{max}$ 는 최대슬립,  $D$ 는  $\frac{F}{E^2}$ ,  $E$ 는  $e_{min} + e_{res}$

$- e_3$ ,  $F$ 는  $s_{min} + \frac{s_{min} \cdot e_3^2}{(e_{min} - e_3)^2 - e_3^2}$ ,  $e_{min}$

는 철근의 최소탄성변형률,  $s_{min}$ 는 최소슬립 그

리고  $e_3$ 는  $\frac{3}{3500}$ 이다.

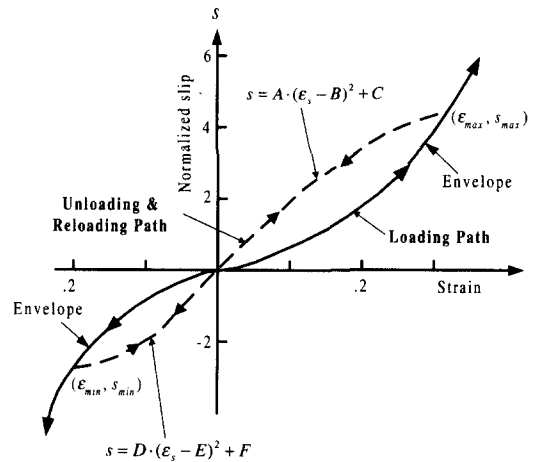


Fig. 1 Strain-slip relationship of reinforcement

### 3.1.2 압축부 관입 모델

두께가 서로 다른 부재의 경계면에 압축력이 작용하면 두께가 큰 부재는 깊이방향에 따라 3차원적으로 압축응력의 크기가 변화하게 된다. 이 연구에서는 3차원적인 응력 분포에 의해 부가되는 경계면에서의 관입을 2차원 해석으로 고려하기 위해서, 경계면이 가상의 높이  $h_i$ 를 갖고 압축응력에 저항하여 경계면이 변형한다고 가정함으로써 3차원적인 응력분포의 영향을 간접적으로 고려하였다(Fig. 2).

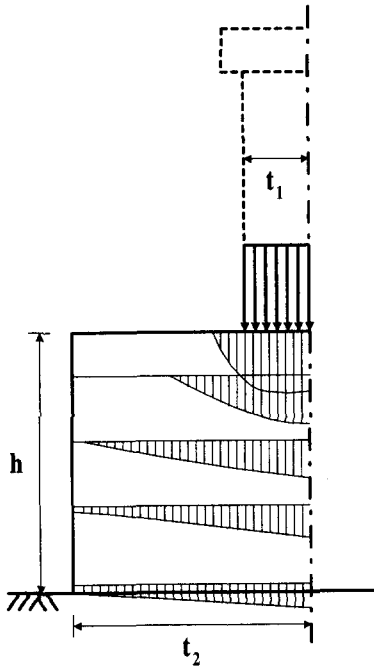


Fig. 2 Three-dimensional effect of interface for compression

콘크리트의 압축강성에 대한 모델은 부재의 재료모델과 같이 탄소성파괴모델을 구속효과를 고려할 수 있도록 수정하여 적용하였다. 다만, 경계면에는 실제의 부재 두께는 존재하지 않으므로 경계면에서의 압축파괴는 발생하지 않는다고 가정하였다. 위의 가정으로부터 경계면의 압축응력  $\sigma_c$ 와 변위  $\omega$ 와의 관계는 탄소성파괴모델의 압축 변형률  $\epsilon$ 를 경계면에서의 압축변위  $\omega$ 로 치환하면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= E_0 K_0 (\epsilon - \epsilon_p) \\ &= E_0 K_0 \frac{(\omega - \omega_p)}{h_i} \\ &= K E_0 K_0 (\omega - \omega_p) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $K E_0$ 는 경계면의 초기압축강성,  $\omega$ 와  $\omega_p$ 는 압축변위와 소성변위 그리고  $K_0$ 는 파괴 파라미터를 나타낸다.

### 3.2 경계면의 전단전달 모델

경계면에서의 전단변형은 일반적으로 경계면에서의 미끄러짐에 의한 변형을 나타낸다. 그러나, 부재 두께가 서로 다른 부재의 경계면에서는 국소적인 응력집중이 발생하기 때문에 이로 인한 변형이 부가된다. 따라서, 본 연구에서는 경계면의 전단변형  $\delta$ 를 경계면에서의 미끄러짐  $\delta_m$ 과 국소적인 응력에 의해 부가된 전단변형  $\delta_m$ 과의 합으로써 고려하였다. 경계면의 전단응력  $\tau_c$ 와 전단변위  $\delta$ 와의 관계는 Li·Maekawa의 접촉면 밀도함수<sup>(6)</sup>에 근거한 콘크리트 균열면에서의 응력 전달 구성식을 수정하여 사용하였으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_c = K_{sf} \delta \quad (8)$$

$$\sigma_{cs} = -\frac{f_{sk}}{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{1}{\beta} \right) - \frac{\beta}{1 + \beta^2} \right] \quad (9)$$

여기서,  $K_{sf}$ 는 경계면의 전단강성,  $\sigma_{cs}$ 는 경계면의 압축응력,  $f_{sk}$ 는  $18 f_{ck}'^{\frac{1}{3}}$  그리고  $\beta$ 는

$$\sqrt{\tau_c / (f_{sk} - \tau_c)} \text{ 이다.}$$

### 4. 수치 예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 3에 나타난 것과 같은 실험체<sup>(7)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 기둥부재의 전반적인 거동을 검증할 수 있을 뿐만 아니라 기둥-기초 접합부의 불연속 변위를 측정하여 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

실험체의 재료물성은 Table 1과 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 Fig. 4에 나타난 것과 같다. 실험체의 바닥과 기둥사이에는 완전고정으로 하였으며, 모든 실험체에는 두 개의 hydraulic jacks에 의해 600kN의 일정한 압축하중을 가한 상태에서, 횡방향으로 250kN MTS actuators에 의해 변위를 가한 경우이다.<sup>(7)</sup>

Table 1 Properties of test specimens

Test specimen	Concrete strength (MPa)	Longitudinal steel		Transverse steel				
		$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_l$ (%)	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_t$ (%)	s (mm)	Confinement configuration	$A_{st} f_{yt}/s$ (N/mm)
U4	32.0	438	3.27	470	2.54	50	Type A	1880
U6	37.3	437	3.27	425	1.95	65	Type B	1262
U7	39.0	437	3.27	425	1.95	65	Type C	1262

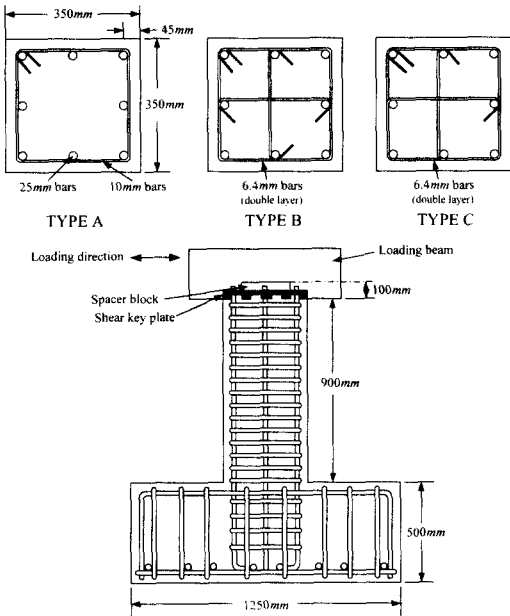


Fig. 3 Geometric details of test specimens

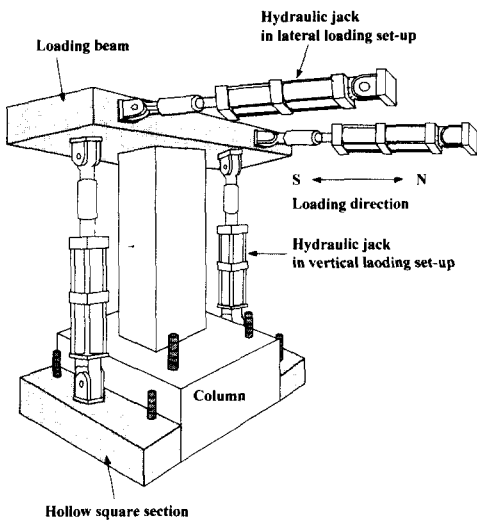


Fig. 4 Test setup

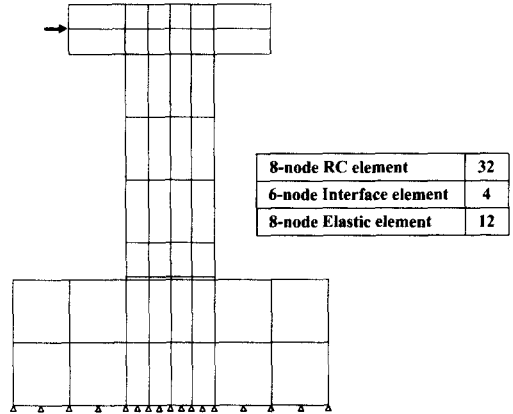


Fig. 5 Finite element mesh used for analysis

Fig. 5는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 망이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 상부 보에는 실험과 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 기둥부재의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속 변위를 고려하기 위하여 본 연구에서 제안한 6절점 경계면요소를 사용하였다.

Fig. 6 ~ Fig. 8은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석과 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있다. 유한요소해석은 경계면요소를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우를 각각 수행하였으며 Fig. 6 ~ Fig. 8에 나타난 바와 같이 경계면요소를 사용한 해석결과가 그렇지 않은 경우에 비해 실험결과를 보다 정확하게 추적하고 있음을 알 수 있다.

각 실험체의 강성은 반복 주기하중이 작용하는 동안 점차 감소하였다. 이러한 강성 감소의 주요 원인은 부재 접합부에서의 정착슬립과 콘크리트

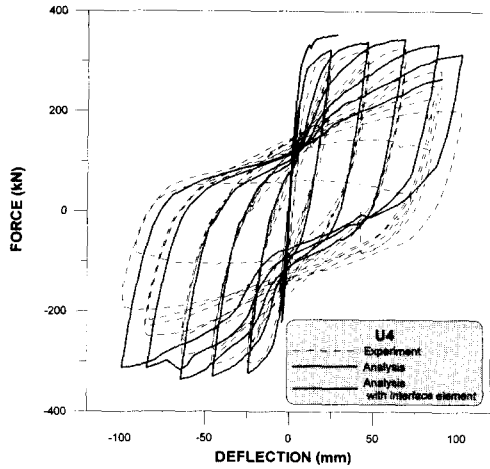


Fig. 6 Load-displacement curves for specimen U4

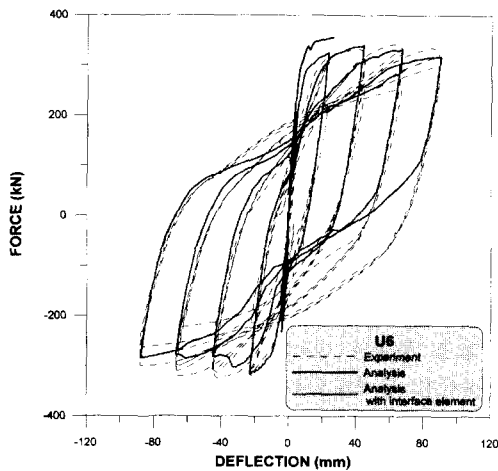


Fig. 7 Load-displacement curves for specimen U6

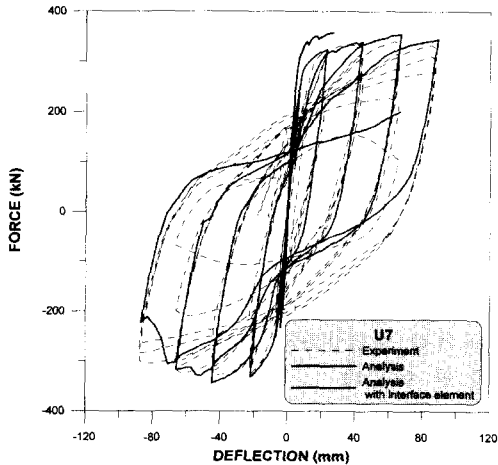


Fig. 8 Load-displacement curves for specimen U7

의 할렬 때문으로 사료된다. 즉 접합부에 균열이 형성되면 주철근의 부착에 대한 저항 능력이 크게 상실하게 되고, 또한, 주철근이 항복함에 따라 접합부에서 부분적으로 슬립이 발생하기 때문이다. 이와 같은 비탄성 거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 이를 충분히 고려할 수 있는 경계면요소 등을 사용한 해석이 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 9 ~ Fig. 10은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 가력점의 수평변위를 전체 변위(▲)와 경계면에서의 정착 슬립에 의한 변위(●)로 나누어 비교하고 있다.

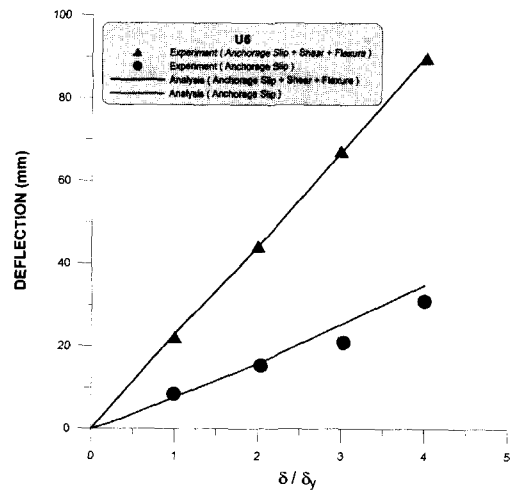


Fig. 9 Components of lateral displacement (U6)

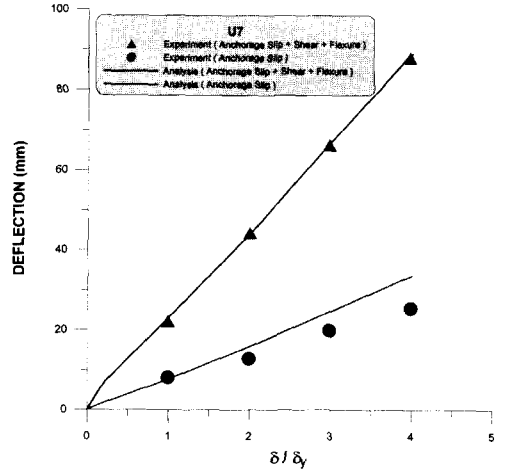


Fig. 10 Components of lateral displacement (U7)

여기서 경계면에서의 정착슬립에 의한 변위는 경계면에서의 정착슬립에 의한 drift 값에 경계면으로부터 가력점까지의 높이를 곱하여 산정한다.

해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있으며 전체 변위중 기둥과 기초부의 접합부에서 정착슬립 등의 불연속 변위로 인한 변위는 실험과 해석결과 모두 약 30%에 달하고 있음을 알 수 있다. 따라서 구조물의 이력 거동 특성을 정확히 평가하기 위해서는 부재 경계면에서의 불연속 변위에 대한 충분한 고려가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 지진시 철근콘크리트 기둥-기초 접합부의 불연속 변위의 비탄성 거동을 파악하기 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석 기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여 반복하중을 받는 실험체를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 철근콘크리트 기둥-기초 접합부의 불연속 변위를 포함한 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 2) 지진하중같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 기둥부재의 비탄성 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 부재 접합부에서의 불연속변위를 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.
- 3) 본 연구에서 제안한 해석기법과 모델을 적용하여 부재 접합부에서의 불연속 변위 등의 영향이 큰 철근콘크리트 교각 등과 같은 구조물의 연성능력 평가를 차후의 연구과제로 다루고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구원(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Saatcioglu, M., Alsiwat, J. M., and Ozcebe, G., "Hysteretic Behavior of Anchorage Slip in R/C Members," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 9, 1992, pp. 2439-2458.
2. 김태훈, 유영화, 신현목, "반복하중을 받는 철근콘크리트 헬구조의 비선형 해석," *한국지진공학회 논문집*, 제4권, 1호, 2000, pp. 35-49.
3. 김태훈, 유영화, 신현목, "등가환산단면을 이용한 원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 해석," *대한토목학회 논문집*, 제20권, 5-A호, 2000, pp.755-763.
4. 유영화, 최정호, 신현목, "횡방향 철근의 구속효과를 고려한 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 비탄성 해석," *한국지진공학회 논문집*, 제2권, 1호, 1998, pp. 79-92.
5. Shima, H., Chou, L., and Okamura, H., "Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete," *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, Vol. 39, No. 2, 1987, pp. 133-194.
6. Li, B., Maekawa, K., and Okamura, H., "Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete," *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, Vol. 40, No. 1, 1989, pp. 9-52.
7. Ozcebe, G., and Saatcioglu, M., "Confinement of Concrete Columns for Seismic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 4, 1987, pp. 308-315.