



횡방향 구속철근의 배근방법에 따른 철근콘크리트 교각의 연성 평가 및 탄소섬유 ROD의 적용

이영호^{1)*} · 이학은¹⁾

¹⁾ 고려대학교 토목공학과

(2001년 3월 12일 원고접수, 2001년 11월 30일 심사완료)

Assessment of Ductility for the RC Piers with Transverse Reinforcement and Application of Carbon-Fiber Rod

Young-Ho Lee^{1)*}, and Hak-Eun Lee¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

(Received on March 12, 2001, Accepted on November 30, 2001)

ABSTRACT

This paper presents a study carried out for the seismic capacity in reinforced concrete(RC) piers by the confinement effect of transverse reinforcement as such a hooked-tied, welded-tied and spiral reinforcement. In order to assess the seismic capacity with transverse reinforcement, experimental and analytical methods were adopted. A RC column survey was conducted based on eight one-fourth scale single circular column specimens designed and tested under slow horizontal cyclic loads. Two cases were analyzed. The confinement effect of concrete by transverse reinforcement is considered not in Case 1 but in Case 2. Also, we studied the propriety of making use of the method in which a carbon fiber rod replace spiral reinforcement in RC piers.

In experimental tests, a welded-tied and spiral reinforcement has a good seismic capacity, but a carbon fiber rod presents low ductility in comparison with a hooked-tied reinforcement. In an analytical study, displacement ductility is approximate to the experimental result because of considering the confinement effect of the transverse reinforcement. Even if the confinement effect of the transverse reinforcement is considered, the analytical results for ductility of the specimens with welded-tied and spiral reinforcement show an excessive underestimation of the experimental results.

Keywords : transverse reinforcement, ductility, confinement effect, carbon fiber rod

1. 서 론

일반적으로 교량의 내진설계를 할 경우 지진파의 횡방향 성분에 가장 취약한 구조인 교각에 중점을 둔다. 교각의 내진설계 방법으로는, 교각의 강성을 크게 해서 설계 지진강도에 대하여 탄성적인 거동을 보이게 하는 방법과 교각의 연성을 크게 해서 어느 정도의 변형을 허용하는 소성적인 거동이 나타나도록 하는 방법이 있다. 철근콘크리트(이하 RC라 함) 교각에 있어서, 설계 지진강도에 대하여 교각이 탄성거동이 되도록 하는 방법은 많은 축방향 철근이 소요되고 이에 따라 단면이 과다하게 확대되어져 도시교가도로 등 교량 하부에 교통량이 많은 지역에서는 시공이 매우 힘들어지며 비경제적인 공법이 된다. 또한, 전단에 의한 취성파괴가 발생할 가능성이 높아진다. 이러한 이유로 교각의 내진설계를 할 경우 대부분 부재의 연

성을 고려한 설계방법을 채택하고 있다¹⁾. 이 연성설계법은 교각이 가지는 부재연성을 크게 하여 교각이 가지는 에너지 흡수능력을 키워주는 방법으로 RC 교각에서는 횡방향 구속철근을 많이 설치하여 부재 연성을 향상시킨다.

RC 교각에 사용할 수 있는 횡방향 구속철근은 띠철근과 나선철근이 있다. 횡방향 구속철근에 의하여 콘크리트는 횡방향 구속효과를 얻게 되어 3축압축을 받는 것과 같은 거동을 보여준다. 이에 따라서 콘크리트의 파괴 변형률이 증가하며 전체적인 RC 구조물의 연성이 증가하게 된다. 콘크리트가 중심축 하중을 받을 경우, 횡방향 구속철근이 띠철근이나 나선철근이나에 따라서 콘크리트의 횡방향 구속효과가 다르며, 또한, 띠철근의 배근형태에 따라서도 차이를 보여주고 있다²⁾. Matusi 등은 RC 교각 내진보강시 동일 보강량이라도 철근 배근 형태에 따라 2배 이상의 보강효과의 차이가 있는 것으로 보고하였다³⁾. 하지만, 지진하중과 같이 횡방향 하중을 받는 RC 교각에 있어

* Corresponding author
Tel : 02-927-4918 Fax : 02-454-7448
E-mail : yh05@orgio.net

서 횡방향 구속철근의 구속효과가 교각의 연성에 미치는 영향에 대해서는 아직 충분한 연구결과가 없는 상태로, 이를 설계에 적용하지 못하고 있다.

본 연구는 2가지 테마에 대하여 연구를 수행하였다.

첫째는 RC 교각의 연성을 향상시키는데 있어서 횡방향 구속철근의 배근방법에 따른 연성의 변화를 규명하였다. 이를 위하여 단독식 교각에 많이 적용하고 있는 원형 단면의 RC 교각을 모델링하여 정적반복 재하실험과 수치해석을 실시하였다.

둘째는 RC 교각의 횡방향 구속철근 배근시 우수한 시공성을 확보하는 것을 목표로 하여 플라스틱 튜브에 탄소섬유를 넣어 현장에서 배치한 후 튜브에 수지를 주입하여 경화시키는 새로운 연속섬유보강재(탄소섬유ROD라 함)를 개발하여 이의 적용성에 관하여 검토하였다. 탄소섬유 ROD는, 수지가 경화되기 전에는 유연한 상태로 시공이 가능하기 때문에 어떤 형태라도 시공이 가능하며, 횡방향 구속철근을 많이 사용하고 복잡하게 배근할 필요가 있는 경우에는 그 시공성이 더욱 뛰어나다. 이를 RC 교각에 나선철근과 같은 형식으로 설치할 경우의 효과에 관하여 나선철근으로 횡방향 보강하였을 경우와 비교·검토하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

본 실험에 사용한 각 재료의 물리적 특성은 Table 1에 나타내며, Fig. 1은 사용한 탄소섬유 ROD의 단면도이다. 탄소섬유 ROD의 제작방법은 서론에서 설명한 바와 같으며, 탄소섬유의 양은 나선철근과의 비교를 위하여 등가단면적을 사용하였으며 플라스틱 튜브는 약 3mm의 두께를 가진다.

2.2 시험체

본 실험에서는 원형 단독식 교각을 모델로 하여 직경 35cm, 기초에서 하중재하 위치까지의 높이 150cm로 하고, 횡방향구속철근의 배근방법 및 탄소섬유 ROD를 실험의 파라메타로 하여 4종류의 시험체를 제작하였으며 각각에 대하여 2종류의 횡방향구속철근비를 두었다. 시험체 개요는 Fig. 2 및 Table 2와 같다.

모든 시험체의 내부에는 축력을 재하하기 위하여 steel sheath(높이 2300mm, 단면 80×50mm, 두께 1.0mm)를 설치하였다.

갈고리이음 띠철근 시험체 HH1, HH2는 두 개의 띠철근을 2/3원씩 설치하여 두 띠철근이 겹치도록 하였으며 135도의 갈고리를 두었다. 용접이음 띠철근 시험체 HW1, HW2는 하나의 철근을 사용하여 약 7cm를 중첩되도록 한 다음 용접을 하였다. 나선철근은 연속적으로 배근하였

Table 1 Materials properties

| Materials | Elastic modulus (kgf/cm ²) | Stress (kgf/cm ²) |
|--------------|--|-------------------------------|
| Concrete | 2.80E+5 | 330 (compression) |
| Bar | D13 | 3200 (yielding) |
| | D10 | 3700 (") |
| | D6 | 3900 (") |
| Carbon fiber | 3.08E+6 | 38000 (fracture) |

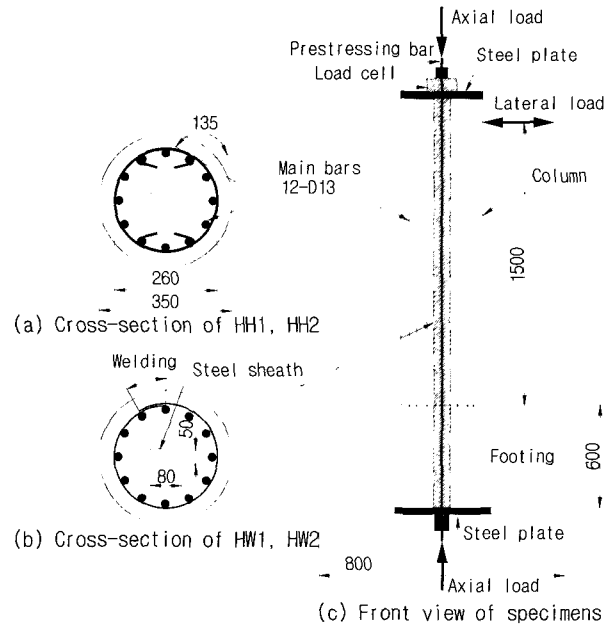


Fig. 2 Details of specimens

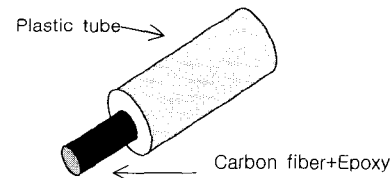


Fig. 3 Carbon fiber rod

으며 접이음은 단면을 일주하였다. 탄소섬유 ROD는 나선철근과 동일하게 배근하였으며, 나선철근과 동일한 강도를 나타내도록 식(1)을 이용한 등가단면적을 사용하였다.

$$A_{CF} = A_s (f_s / f_{CF}) \quad (1)$$

여기서 A_{CF} , A_s , f_s , f_{CF} 는 각각 탄소섬유와 철근의 단면적 및 항복응력을 나타낸다.

2.3 실험방법

본 실험은 정적반복 하중재하로 실시하였으며, 하중재하는 축력과 횡력을 동시에 가하였다. 축력은 Fig. 2와 같이 시험체 중앙에 미리 공간을 마련하고 이곳에 PC 강봉을

Table 2 Characteristic of specimens

| Specimens | Diameter (cm) | Height (cm) | Vertical reinforcement | | Axial stress (kgf/cm ²) | Transverse reinforcement | | | Fixing of transverse bar |
|-----------|---------------|-------------|------------------------|----------|--|--------------------------|-----------|-----------------|--------------------------|
| | | | Reinforcing bar | ratio(%) | | Reinforcing bar | space(cm) | volume ratio(%) | |
| HH1 | φ35 | 150 | 12-D13 | 1.58 | 10 (Axial force/f _{ck} A _g =3%) | D10 | 20 | 0.51 | Hook |
| HH2 | | | | | | D10 | 10 | 1.02 | |
| HW1 | | | | | | D10 | 20 | 0.51 | Welding |
| HW2 | | | | | | D10 | 10 | 1.02 | |
| S1 | | | | | | D6 | 9 | 0.51 | Spiral |
| S2 | | | | | | D10 | 10 | 1.02 | |
| CF1 | | | | | | Carbon Fiber-ROD | 20 | 0.051 | Spiral |
| CF2 | | | | | | | 10 | 0.102 | |

넣어 재하 하였으며, 횡방향 변위의 증감으로 인한 PC 강봉의 도입 축력의 변화가 발생하지 않도록 조정하여 일정한 축력이 지속적으로 가해지도록 하였다. 항복변위 1δy까지는 축방향 철근의 항복을 기준으로 하였다. 이때 축방향철근의 항복은 인장측 최외측 축방향 철근의 항복으로 하지 않고 인장측 철근의 합력이 작용하는 곳에서 철근의 항복이 발생할 때를 항복으로 하였다⁴⁾. 항복 이후는 항복변위의 정수배로 변위를 증감시키면서 변위 제어하여 파괴시까지 실험을 실시하였다. 파괴변위는 교각의 강도가 항복하중 이하로 떨어질때를 파괴로 하였다.

3. 실험결과

3.1 실험의 경과 및 파괴형상

본 실험의 주요한 파괴과정은, 수평균열→축방향 철근항복→경사균열→피복콘크리트 박리→띠철근 갈고리부가 벌어짐(갈고리 이음 시험체에 한함)→콘크리트 압축파괴→축방향철근 좌굴→축방향철근 인장파괴의 순으로 발생하였으며, 모든 시험체는 휨파괴하였다

모든 시험체가 1δ_y 재하중에 횡방향 휨균열이 발생하였으며, 3δ_y~4δ_y에 걸쳐 휨균열이 전단방향으로의 균열로 변화하였다. 4δ_y에서 압축측 콘크리트의 압축균열이 발생하였으며, 그 뒤에는 새로운 균열은 발생하지 않고 기둥과 기초가 만나는 경계면에 균열이 집중되었으며 이 곳의 균열폭이 점차 확대되었다.

모든 시험체가 피복 콘크리트의 탈락이 발생함과 동시에 강도가 조금씩 감소하기 시작하였다. 갈고리이음 띠철근을 사용한 HH1과 HH2 시험체는 피복 콘크리트의 탈락과 더불어 강도가 상당히 감소하였으며, 갈고리부의 펴짐과 축방향 철근의 좌굴이 발생하여 파괴상태에 도달하였다.

이외의 시험체도 피복 콘크리트가 탈락과 동시에 강도

의 감소가 관찰되었으나, 강도의 급격한 감소는 없었으며 횡방향 구속철근의 큰 손상은 관찰되지 않고 축방향 철근의 좌굴만이 발생하였다.

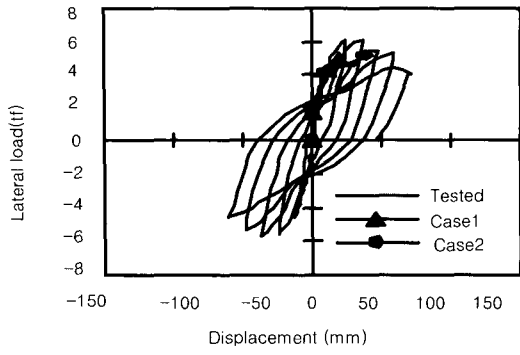
탄소섬유 ROD를 나선철근 대응으로 사용한 CF1과 CF2는 S1과 S2 시험체와 거의 동일한 파괴과정을 보여주었으나, S1, S2 시험체에 비해 조금씩 일찍 파괴에 이르렀다. 이는 시험에 사용한 탄소섬유 ROD의 단면적중 역학적으로 아무런 의미가 없는 비닐 튜브가 차지하는 비율이 약 90%에 달하였기 때문으로 사료된다. 즉, 비닐이 있는 부분만큼 축방향 철근의 좌굴이 용이하게 되어 다른 시험체에 비하여 좌굴장이 길어졌기 때문이다.

3.2 하중-변위 관계

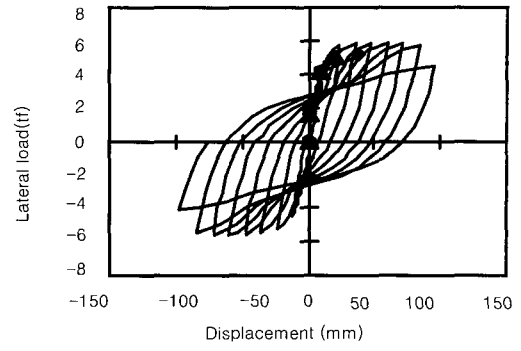
시험체의 수평하중과 하중재하점 위치에서의 수평변위와의 관계 예를 Fig. 3에, 각 시험체의 하중사이클에 따른 최대하중의 비교를 Fig. 4에 나타내었으며, 주요결과를 Table 3에 나타낸다. 이들에 의하면 전체적으로 항복하중 및 최대하중은 횡방향 보강근의 종류와 보강량에 관계없이 거의 일정한 값을 보여주고 있다.

하지만, 파괴변위에 있어서는 횡방향 보강철근의 양과 배근방법에 따라 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 보강량이 많을수록 파괴변위가 증가하였으며, 철근만을 본다면 갈고리이음 띠철근인 HH1과 HH2 시험체가 용접한 띠철근인 HW1, HW2 그리고 나선철근인 S1, S2에 비하여 훨씬 빠르게 파괴에 도달하였다. 이는 HH1, HH2 시험체는 갈고리이음부가 구조적 약점이 되어 이 부분의 파괴가 선행되어 띠철근의 역할을 충분히 수행하지 못하였기 때문으로 사료된다.

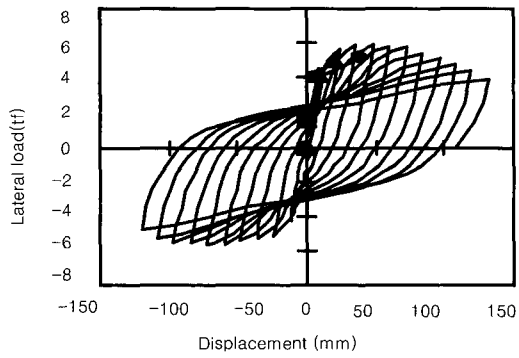
용접이음과 나선철근을 비교하여 보면, 보강량은 같지만 배근간격의 차이로 인하여 HW1 시험체가 S1 시험체의 약 80%의 변위에서 파괴에 이르렀으나, 같은 배근간격을



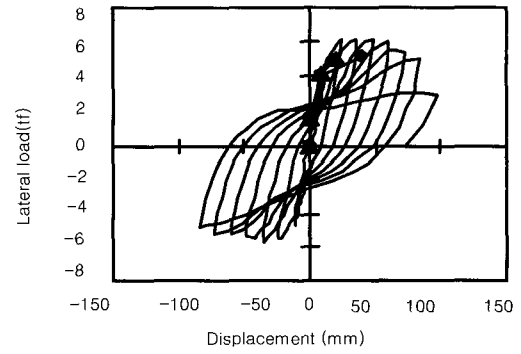
(a) HH1



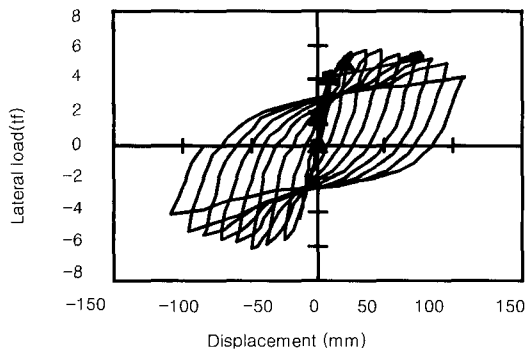
(b) HW1



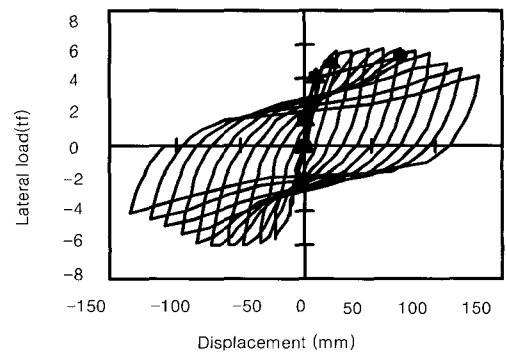
(c) S1



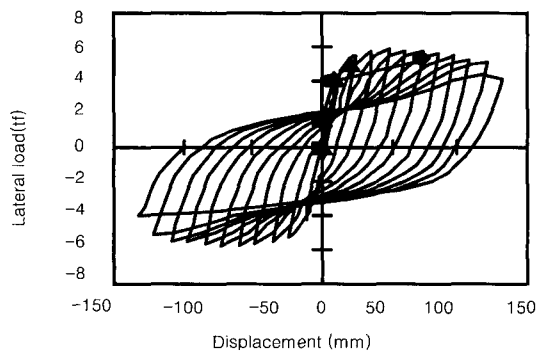
(d) CF1



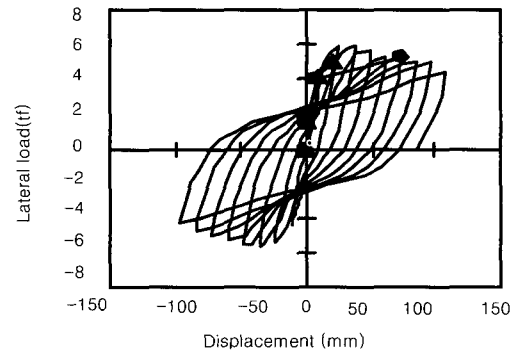
(e) HH2



(f) HW2



(g) S2



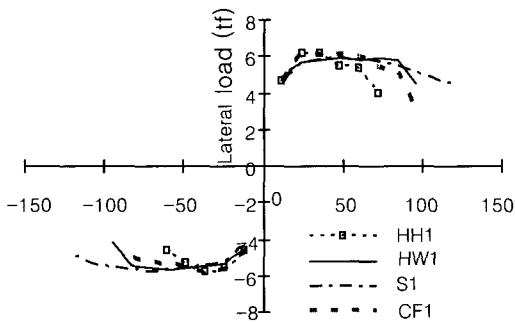
(h) CF2

Fig. 3 Lateral load-displacement response

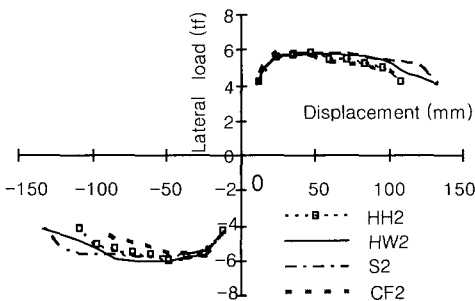
Table 3 Comparison of measured results with calculated results

| Classification | Test | | | | Analysis | | Test | | | | Analysis | |
|---------------------------|------|------|-------|------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|------|----------|-------|
| | HH1 | HW1 | S1 | CF1 | case1 | case2 | HH2 | HW2 | S2 | CF2 | case1 | case2 |
| Yield load (tonf) | 4.65 | 4.60 | 4.37 | 4.55 | 4.14 | 4.08 | 4.21 | 4.23 | 4.21 | 4.68 | 4.14 | 4.05 |
| Yield disp. (mm) | 12.0 | 11.8 | 11.9 | 11.9 | 9.12 (3.97)* | 9.33 (4.07)* | 12.1 | 12.0 | 12.1 | 11.9 | 9.12 | 9.39 |
| Max load (tonf) | 5.92 | 5.75 | 5.70 | 5.93 | 4.96 | 5.10 | 5.68 | 5.91 | 5.76 | 5.77 | 4.96 | 5.22 |
| Ultimate disp. (mm) | 69.4 | 89.5 | 115.0 | 84.9 | 20.2 (4.08)* | 39.2 (3.98)* | 103.2 | 125.0 | 131.9 | 94.3 | 20.2 | 72.8 |
| Disp. ductility | 5.8 | 7.6 | 9.7 | 7.1 | 2.2 | 4.2 | 8.5 | 10.4 | 10.9 | 7.9 | 2.2 | 7.8 |
| Disp. in max load (mm) | 36.2 | 48.0 | 48.0 | 36.3 | | | 48.2 | 60.4 | 61.2 | 36.1 | | |
| Energy dissipation(tf-mm) | 995 | 3318 | 5485 | 2691 | | | 4328 | 6543 | 6370 | 3850 | | |

Note : * The number of () is rotational displacement by the pull-out of longitudinal reinforcement



(a) HH1, HW1, S1, CF1 specimens



(b) HH2, HW2, S2, CF2 specimens

Fig. 4 Comparison of envelope of hysteresis loops

가진 HW2와 S2 시험체의 파괴변위는 거의 일치한다.

또한, 탄소섬유 ROD 시험체도 나선철근의 경우와 비교하여 보면 상당히 빨리 파괴가 일어났으나, 갈고리이음 띠 철근 시험체와는 거의 비슷한 결과를 나타냈다.

3.3 등가강성 및 에너지소산능력

Fig. 5에 하중재하에 따른 유효강성의 변화를, Fig. 6에 누적 에너지소산량을 나타낸다. 이 때, 횡보강철근비가 0.51% 시험체에 대하여 시험체에 따른 차이가 큰 loading cycle 4~8δ, 부분만을 나타내었다. 유효강성과 에너지

소산량은 하중-변이곡선에서 구해지며, 에너지 소산량은 구조물이 가지는 에너지 소산능력을 나타내는 지표로 사용된다^{5,6)}.

유효강성 및 에너지소산량은 3δ까지는 모든 시험체가 거의 동일한 값을 나타내었으나 4δ부터 갈고리이음 띠 철근 시험체와 탄소섬유 ROD 시험체의 값이 다른 시험체에 비해 떨어지기 시작하였다. Table 3의 총 에너지소산량을 보면 횡방향 구속철근의 양에 따라 에너지소산능력이 증가함과, 용접이음 띠 철근 시험체와 나선철근 시험체가 갈고리이음 띠 철근 시험체에 비하여 우수한 에너지소산능력을 가짐을 알 수 있다. 이는 띠 철근의 갈고리부가 콘크리트를 구속하는데 있어서 구조적인 문제점이 됨을 보여준다. 탄소섬유 ROD 시험체 역시 나선철근 시험체에 비해서는 작은 에너지소산능력을 나타내고 있으나 갈고리이음 띠 철근과는 동등 이상의 결과를 나타낸다.

4. 시험체 해석방법

해석은 횡방향 구속근의 구속효과를 고려하지 않고 ϵ_{cc} 를 0.002로, 콘크리트의 파괴변형률 ϵ_{cu} 를 0.003으로 일정하게 하여 계산한 경우(case 1이라 함)와 횡방향 구속철근의 구속효과를 고려하여 계산한 경우(case 2라 함)에 대하여 실시하였다.

4.1 콘크리트의 응력-변형률 관계

철근콘크리트 교각에서 콘크리트의 응력-변형률 관계 및 교각의 연성도는, 축방향철근비, 횡방향구속철근비, 콘크리트 강도, 축압축력 및 강도비 등에 의해 결정되어진다. 본 연구에서는 횡방향구속철근을 주요인자로 하므로 이에 상응하고 일본에서 내진설계에 많이 적용하고 있는 콘크리트응력-변형률 관계식을 이용하여 case 2 해석을 실시하였다.

해석에 사용한 각 재료의 응력-변형률 관계는 Fig. 7과 같이 철근은 완전 탄소성체로, 콘크리트는 횡방향 구속철근량을 평가인자로 하여 식 (2)와 같이 가정하였다.

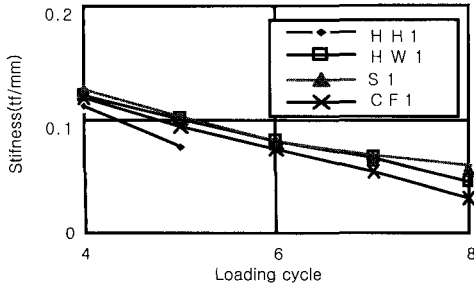


Fig. 5 Stiffness

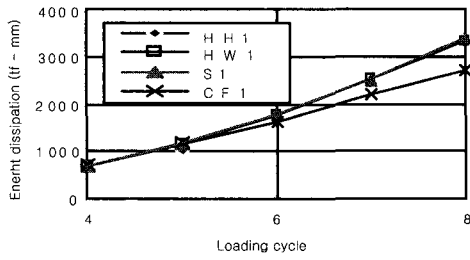


Fig. 6 Cumulative energy dissipation

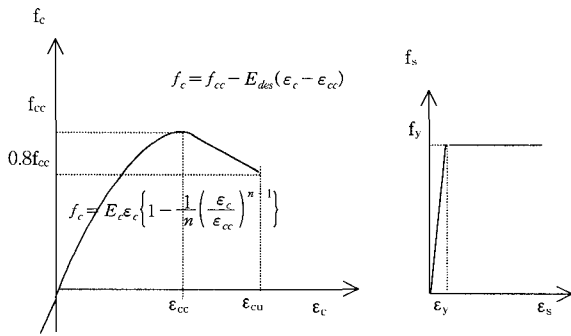


Fig. 7 Stress-strain relationship of materials

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} & (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \\ f_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) & (\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (2)$$

$$n = E_c \varepsilon_{cc} / (E_c \varepsilon_{cc} - f_{cc}) \quad (3)$$

$$f_{cc} = f_{ck} + 3.8 (\rho_s f_{sy} + \rho_{cf} f_{cf}) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \left(\frac{\rho_s f_{sy}}{f_{ck}} \right) \quad (5)$$

$$E_{des} = 11.2 (f_{ck}^2 / \rho_s f_{sy}) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + 0.2 f_{cc} / E_{des} \quad (7)$$

여기서,

f_c : 콘크리트 응력도 (kgf/cm²)

f_{cc} : 횡구속철근으로 구속된 콘크리트강도 (kgf/cm²)

f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도 (kgf/cm²)

ε_c : 콘크리트의 변형률

ε_{cc} : 최대압축응력시의 변형률

ε_{cu} : 횡구속철근으로 구속된 콘크리트의 파괴변형률

E_c : 콘크리트의 탄성계수

E_{des} : softening계수 (kgf/cm²)

ρ_s : 횡구속철근의 체적비

f_{sy} : 횡구속철근의 항복응력 (kgf/cm²)

4.2 항복하중 및 극한하중

시험체의 강도는 다음과 같이 구한다. 우선, 시험체를 높이 방향으로 m 분할하고 각각의 단면을 다시 n 분할한다. 각 단면에서의 휨모멘트 M을 다음식으로 계산한다⁷⁾.

$$M = \sum_{i=1}^n f_{ci} x_i \Delta A_{ci} + \sum_{i=1}^n f_{si} x_i \Delta A_{si} \quad (8)$$

여기서, f_{ci} , f_{si} , ΔA_{ci} , ΔA_{si} 는 각각 단면내 i번째 요소의 콘크리트와 철근의 응력도 및 단면적, x_i 는 각 요소에서 중립축까지의 거리이다.

상기의 식에서, 축방향철근에 작용하는 인장력 합력위치의 변형률이 철근의 항복변형률 ε_{sy} 에 다다를 때의 휨모멘트와 곡률을 각각 항복 휨모멘트로 하며, 콘크리트가 극한 변형률 ε_{cu} 가 되면 극한상태로 본다.

4.3 항복변위 및 극한변위

4.3.1 휨모멘트에 의한 변위

강도계산과 같은 방법으로 단면을 분리하여 다음식으로 각 단면의 곡률을 계산한다⁷⁾.

$$\phi_i = \varepsilon_{oi} / x_0 \quad (9)$$

각 단면에서의 곡률이 구해지면 휨모멘트에 의한 변위 δ_m 은 식(10)과 같이 구한다.

$$\delta_m = \sum_{i=1}^m (\phi_i y_i + \phi_{i-1} y_{i-1}) \Delta y_i / 2 \quad (10)$$

여기서, ε_{oi} 는 콘크리트의 압축 변형률, x_0 는 콘크리트 압축축에서 중립축까지의 거리를 나타내며, ϕ_i , y_i 는 각각 i번째 단면의 곡률과 시험체 하중제하 위치에서의 거리를 나타내며, Δy_i 는 각 요소의 높이방향 두께이다.

4.3.2 축방향철근의 인발력에 의한 변위

철근콘크리트 교각은 지진과 같은 횡하중을 받을 경우 휨모멘트에 의한 변위외에, 축방향철근의 인발력에 의해 기초에 매립된 축방향 철근이 늘어나게 되어 이에 의한 교각의 회전변위가 발생한다. 축방향 철근의 인발력에 의해 발생하는 교각의 회전변위는 Fig. 8과 같이 구할 수

있으며, 이 때의 철근의 항복시 변위량 ΔL_y 는 식(11)로, 파괴시 변위량 ΔL_u 는 Ishibashi 등의 연구결과인 식(12)로 구한다⁸⁾. 여기서, D 는 철근간격을, ϕ 는 철근직경을 나타낸다.

$$\Delta L_y = 0.070 - 0.0054D/\phi + 0.00017(D/\phi) \quad (11)$$

$$\Delta L_u = 0.083 - 0.0054D/\phi + 0.00015(D/\phi)^2 \quad (12)$$

이상과 같이 휨모멘트에 의한 변위와 축방향철근의 늘어남에 의한 회전변위를 구하면, 식(13)과 같이 두 변위값을 더함으로써 시험체의 전체변위 δ 를 구할 수 있다.

$$\delta = \delta_m + \delta_p \quad (13)$$

5. 시험체 해석결과 및 고찰

5.1 강도 및 변위

해석결과를 Table 3에 정리하고, Fig. 3에 예를 나타내었다. 이에 의하면 항복하중 및 최대하중은 실험결과와 해석결과가 대부분의 시험체에서 90% 이상의 정확도를 보여주고 있다.

항복변위는 축방향철근의 인발력에 의한 회전변위를 고려함으로 인하여 실험결과와 유사한 값을 나타내고 있다. 이 회전변위는 전체 항복변위 계산값의 약 40% 이상의 높은 영향을 차지하고 있어, 철근콘크리트 교각의 항복변위를 계산할 경우 반드시 고려하여야 할 것으로 사료된다. 반면에 파괴변위는 교각의 소성변형이 주요 인자로, 본 연구에서와 같이 연성도가 높은 교각에 대해서는 특별히 고려할 필요가 없는 것으로 사료된다. 해석에서 구한 파괴시의 변위값은, 횡방향구속철근의 배근방법에 따라 조금씩

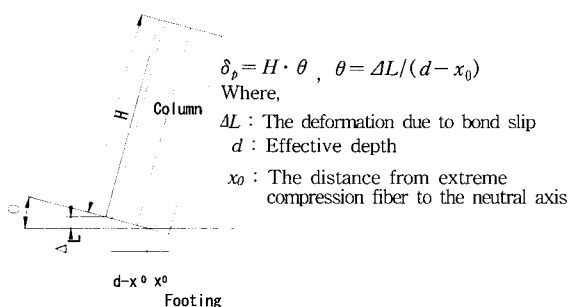


Fig. 8 Displacement by pull-out of main bar

차이를 보이고 있으나, 전반적으로 실험의 파괴시의 변위값보다 상당히 작은 값을 나타내고 있으며, 최대하중시의 변위값과 어느정도 일치하고 있다. 이는 실험과 해석에서의 파괴의 정의가 다르기 때문으로, 실험에서는 전체부재의 강도가 최대하중의 80%로 떨어졌을 때를 파괴로 정의

한 반면, 해석에서는 콘크리트의 응력이 최대응력의 80%로 떨어졌을 때를 파괴로 보았기 때문이다.

5.2 횡방향 구속철근의 영향

횡방향 구속철근의 영향을 고려하지 않고 계산한 case 1은, 모든 시험체가 같은 결과를 보이고 있다. 실험결과와 비교하여 보면 강도는 비교적 일치하고 있으나, 변위값은 모든 시험체가 같은 결과를 보이고 있어 실험에서 나타난 횡방향 구속철근의 양에 의해 발생하는 부재 연성의 차이를 나타내지 못하고 있으며, 실험결과에 비해 매우 작은 값을 보여주고 있다.

이에 비해 횡방향 구속철근의 영향을 고려하고 계산한 case 2는 횡방향구속철근의 양에 따라 다른 파괴변위값을 보이는 실험결과를 비교적 잘 따르고 있다.

5.3 횡방향 구속철근 배근방법에 따른 영향

Case 2의 해석결과를 보면 갈고리 이음을 한 띠철근 시험체 III1 및 III2와 파괴변위가 가장 근사한 값을 보여주고 있으며, 용접이음을 한 시험체와 나선철근 시험체 보다는 매우 작은 값을 나타내고 있다. 이는 일본도로교 시방서에서 제시하고 있는 횡방향구속철근의 구속효과에 관한 평가식이 갈고리이음 띠철근을 중심으로 하여 작성된 것이기 때문으로 사료되며, 어느정도의 안전율을 고려하더라도 용접이음을 한 띠철근과 나선철근을 사용할 경우는 콘크리트의 구속효과를 좀 더 높여줄 필요가 있다.

나선철근 및 용접이음 띠철근에 의한 콘크리트의 구속효과를 증대시키기 위하여 횡방향 구속철근의 구속효과에 의한 최대하중시의 변위값을 나타내는 식(5) 및 파괴시의 변위값을 결정하는 식(6)의 softening 계수에 나선철근의 영향계수 α 를 도입하였다. 실험결과 나선철근의 구속효과가 최대하중시의 변위 보다 파괴시의 변위에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 이를 명확히 구분할만한 많은 실험결과가 축적된 상황이 아니므로 두 식에 사용하는 계수를 같은 값으로 하였다.

$$\epsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta \left(\frac{\rho_s f_{sy}}{f_{ck}} \right) \quad (14)$$

$$E_{des} = 11.2(f_{ck}^2 / \beta \rho_s f_{sy}) \quad (15)$$

Table 4 Effect of spiral coefficient

| Specimens | Ultimate displacement | | | | |
|-----------|-----------------------|-------------|-------|-------|-------|
| | Test | Calculation | | | |
| | | $\alpha=1$ | 1.5 | 1.8 | 2 |
| S1 | 115.0 | 39.2 | 56.2 | 66.2 | 72.8 |
| S2 | 131.9 | 72.8 | 102.2 | 120.0 | 131.7 |

위와 같은 식을 사용하고 α 에 따른 파괴변위를 계산하여 Table 4에 나타내었다. 이를 보면, 사용한 횡방향 구속 철근비에 따라 다소 차이는 있으나, 나선철근의 영향계수 α 를 2로 하여도 실험결과보다 작은 변위값을 보여주고 있다. 이 결과는 본 실험에 사용된 시험체의 결과에 국한된 것으로, 보다 일반화된 결과를 도출하기 위해서는 많은 자료의 축적이 필요하다고 사료되나, 나선철근의 구속효과를 갈고리이음 띠철근의 구속효과와 동등하게 보는 것은 상당한 과소평가임을 알 수 있다.

6. 결 론

철근콘크리트 교각에서 횡방향 구속철근의 배근방법이 부재연성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 원형 철근콘크리트 교각의 축소 모델을 제작하여 정적반복 재하실험을 실시하고 이에 대하여 해석을 실시하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 갈고리이음 띠철근은 갈고리부가 가지는 구조적 약점으로 인하여 용접이음 띠철근과 나선철근에 비하여 교각의 연성이 많이 감소하였다.
- 2) 용접이음 띠철근은 배근간격이 같을 경우 나선철근과 비슷한 횡구속 효과를 나타내었다.
- 3) 탄소섬유ROD를 나선철근 대용으로 사용할 경우 탄소섬유ROD의 플라스틱 피복으로 인하여 콘크리트와 접착력이 감소하였고 피복이 두꺼워 축방향 철근의 좌굴방지 효과가 미미하였으나, 콘크리트와의 접착 문제와 피복의 두께를 감소시켜 시공하면 우수한 시공성을 가지는 나선철근의 대용 공법으로 사용 가능하리라 기대된다.
- 4) 철근콘크리트 교각의 항복변위를 산정 할 경우, 축방

향 철근의 인발력에 의한 회전변위를 고려해야 한다.

5) 철근콘크리트 교각의 연성을 평가하는데 있어서 횡방향 구속철근의 영향을 고려한 계산방법이 보다 정확한 방법으로 나타났다.

6) 나선철근에 의한 횡방향 구속효과를 고려할 경우, 갈고리이음 띠철근의 구속효과와 동등하게 보는 것은 다소 과소평가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會, “兵庫縣南部地震に關する耐震技術特別研究委員會報告書,” 東京, 1997.
2. MacGregor, J. G., “Reinforced Concrete,” Prentice-Hall, New York, 1997.
3. 李泳昊, 松井繁之, 小林郎, 眞鍋隆, “圓形 RC 橋脚の耐震補強に關する實驗的研究,” 日本コンクリート工學論文報告集, 第20卷, 第1号, 1998, pp.557~563.
4. 日本上木學會コンクリート委員會, “阪神淡路大震災被害分析とじん性率評價式,” 上木學會, 東京, 1996, pp.49~55.
5. Priestley, M. J., Seible, N. F., and Calvi, G. M., “Seismic Design and Retrofit of Bridges,” John Wiley & Sons, New York, 1996.
6. 瀧本和志, 川島一彦, “基部で曲げ破壊するRC橋脚のエネルギー吸収容量の定式化,” 上木學會論文集, No. 532/V-30, 1996.2, pp.5~13.
7. 日本道路協會, 道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 日本道路協會, 東京, 1996. 12, pp.119~133.
8. 石橋忠良, 吉野伸一, “鐵筋コンクリート橋脚の地震時變形性能に關する研究,” 日本上木學會論文集 第390號/V-8 1988, pp.57~66.

요 약

본 연구는 횡방향 구속철근의 배근형태가 철근콘크리트 교각의 연성에 미치는 영향을 파악하기 위해서, 단독식 원형 교각을 모델링하고 횡방향 구속철근의 배근방법(갈고리이음 띠철근, 용접이음 띠철근, 나선철근)을 파라메타로 하여 정적반복 재하실험을 실시하고, 이를 두가지 해석방법(횡방향 구속철근 영향의 유무)으로 해석·비교하였다. 또한, 탄소섬유를 나선철근 대용으로 사용하는 공법의 타당성을 검토하였다. 실험결과, 나선철근과 용접이음 띠철근이 갈고리이음 띠철근에 비해 상당히 우수한 연성을 가지는 것으로 나타났으며, 탄소섬유를 나선철근 대용으로 사용한 시험체는 탄소섬유를 둘러싸는 플라스틱 튜브의 영향으로 다소 구속효과가 떨어지는 것으로 나타났다. 해석결과, 횡방향 구속철근의 영향을 고려하여 계산한 경우가 보다 더 실험치에 근사한 값을 보여주었으며, 나선철근과 용접이음 띠철근일 경우 기존 평가식에 의한 연성평가가 상당히 과소평가 되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 횡방향 구속철근, 연성, 구속효과, 탄소섬유 ROD