

기존 원형교각의 내진성능 향상을 위한 FRP 보강에 대한 이론적 연구

권태규^{1)*} · 최영민²⁾ · 황윤국³⁾ · 윤순종⁴⁾

¹⁾ 한국건설기술연구원 ²⁾ 한양대학교 ³⁾ 한국건설기술연구원 ⁴⁾ 홍익대학교

(2003년 7월 29일 원고접수, 2003년 12월 1일 심사완료)

A Theoretical Study on the FRP Retrofit of Existing Circular Bridge Piers for Seismic Performance Enhancement

Tae-Gyu Kwon^{1)*}, Young-Min Choi²⁾, Yoon-Kook Hwang³⁾, and Soon-Jong Yoon⁴⁾

¹⁾ KICT, Koyang, 411-712, Korea

²⁾ Hanyang University, Ansan, 425-791, Korea

³⁾ KICT, Koyang, 411-712, Korea

⁴⁾ Hongik University, Seoul, 121-791, Korea

(Received July 29, 2003, Accepted December 1, 2003)

ABSTRACT

The bridge piers under service suffered a brittle failure due to the deterioration of lap-spliced longitudinal reinforcement without developing its flexural capacity or ductility. The earthquake induced lateral force results in tension which causes bond-slip failure at the lap-spliced region in circular bridge piers. In this case, such a brittle failure can be controlled by the seismic retrofit using FRP laminated circular tube. The retrofitted piers using FRP laminated circular tube showed significant improvement in seismic performance due to FRP's confinement effect. This paper presents the analytical results on the seismic strengthening effect of circular bridge piers with poor lap-splice details and strengthened with FRP laminated circular tube. FRP's confinement effect is predicted by the classical elasticity solution for the laminated circular tube manufactured with several layers. The FRP laminated circular tube induces the flexural failure instead of a bond-slip failure of the circular reinforced concrete piers under seismic induced lateral forces. To investigate the correctness and effectiveness of analytical solution derived in this study, the analytical results were compared with the experimental data and it was confirmed that the results were correlated well each other. The effects on the confinement of FRP laminated circular tube, such as the number of layers, the fiber orientations, and the mechanical properties, were investigated. From the parametric study, it was found that the number of layers, the fiber orientations, and the major Young's modulus (E_{11}) of the FRP laminated circular tube were the dominant parameters affecting the confinement of reinforced concrete circular bridge piers.

Keywords : bridge pier, lap-splice, earthquake, FRP

1. 서 론

20세기에 들어서서 전 세계적으로 지진활동이 다시 활발해지고 있고, 그에 따른 피해 또한 심각하다. 특히 최근에 발생한 미국 캘리포니아와 일본 고베 지진을 통해 그 피해의 심각성을 알 수 있다. 또한 우리나라도 20세기 중반 이후에 지리산 지진, 동해 지진, 속리산 지진, 홍성 지진, 영월 지진에 이르기까지 중진이 여러 차례 관측되었다. 이러한 관측으로 볼 때 한반도에도 지진활동이 활발

해질 가능성이 큰 것으로 예상된다¹⁴⁾. 이에 따라, 국내에서도 내진설계개념이 설계에 반영되기 시작하여 1992년 미국의 AASHTO 시방서를 참고로 한 내진설계규정이 도로교표준시방서에 도입되었다. 1997년도에 한국건설기술연구원이 내진설계기준을 제시하였고, 2000년도에 개정된 도로교설계기준에서는 이 내용을 일부 반영한 새로운 내진설계요건을 추가하였다¹³⁾.

그러나 이러한 내진설계규정은 신설된 교량에 적용되고 있으므로 내진설계규정의 도입 이전에 건설된 교량은 지진에 대한 영향을 고려하지 않고 설계, 시공되었다. 또한 공용연수의 증가에 따라 교각의 콘크리트에 열화손상이 많이 진행되어 있으므로 적절한 보강이 필요하다.

* Corresponding author

Tel : 031-910-0138 Fax : 031-910-0121

E-mail : coolkwon@freechal.com

본 연구에서는 지진이 발생할 경우 교각에 발생할 수 있는 여러 가지 파괴모드 중 먼저, 우리나라 콘크리트 교각 교각의 상당 부분을 차지하고 있는 큰 형상비를 가진 교각으로서 기초와의 연결부가 철근의 겹침이음으로 되어 있는 내진보강 이전의 교각에 관한 내진보강에 대해 고찰하고자 하였다. 다시 말해, 큰 형상비를 갖는 콘크리트 교각에 지진이 발생할 경우 기초부와 가까운 소성힌지구역에서의 피복콘크리트의 탈락에 의한 부착력의 손실로 인해 겹침이음 철근의 파괴가 발생할 수 있기 때문에 이러한 파괴를 방지하기 위해 FRP 원통관을 사용하여 피복콘크리트의 구속응력을 증가시킴으로써 콘크리트와 철근의 부착파괴를 예방할 수 있다. FRP의 복잡한 재료특성으로 인해 FRP 적층 원통관으로 보강된 콘크리트 교각의 파괴 거동을 정확하게 예측하기 위한 연구가 국외에서 다소 진행되고 있으나 아직은 미흡한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 지진에 의해 횡하중을 받는 원형교각을 FRP 적층 원통관으로 보강할 경우 FRP 적층 원통관이 발휘하는 구속응력을 계산할 수 있는 이론식을 탄성해석으로부터 유도하였고, 유도된 식을 사용한 탄성해석을 수행하여 FRP 적층 원통관의 구속응력 증가에 따른 원형교각의 내진거동 특성을 분석하였다. 본 연구는 콘크리트 원형교각만을 대상으로 하였으며, 이론적 연구를 수행하고 그 결과를 사용하여 이론적 연구의 타당성 및 실용성을 검증하기 위해 기존의 실험적 연구결과¹¹⁾와 비교, 분석하였다. 또한 매개변수(적층수, 배향각, 재료의 역학적 성질)해석을 수행하여 각 매개변수가 구속응력에 미치는 영향을 검토, 분석하여 기존 원형교각에 대한 FRP 적층 원통관을 이용한 내진보강설계에 필요한 기술자료를 제공하였다. 본 연구의 주제와 관련하여, Matsuda 등⁶⁾은 일방향 탄소섬유시트(sheet)로 내진보강한 원형교각의 휨파괴 구간을 대상으로 실험적 연구를 수행하였으며, Chai³⁾과 Seible 등¹²⁾은 탄소섬유시트에 비해 경제적인 유리섬유(E-glass) 시트를 사용하여 내진보강한 교각의 거동에 대한 연구를 수행하였다. Saadatmanesh 등⁹⁾은 유리섬유 복합재를 감싸는 방법으로 내진보강한 원형교각의 거동에 대해 연구하였으며, Seible 등¹⁰⁾은 포장(wrapping)하는 자동화 기계를 사용하여 탄소섬유로 내진보강한 원형교각에 대해 실험 및 이론적 연구와 더불어 실제 현장에서 실물실험을 수행하였다. 동 연구자에 의해 지진에 대한 원형교각의 파괴거동에 따른 보강방법에 대해 연구가 수행되었다. 즉, 전단보강, 휨보강, 부착파괴에 대한 보강으로 나누어 내진보강에 대해 연구하였다. Xiao 등¹¹⁾은 기존 공용중인 교각에 대하여 비보강, 4겹 FRP 적층 보강, 5겹 FRP 적층 보강한 경우에 대하여 각각 준정적 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 Xiao 등¹¹⁾이 수행한 실험의 결과로 얻어진 횡하중-변위 관계와 본 연구에서 유도된 식으로부터 얻어진 횡하중-변위 관계를 비교함으로써 이론적 연구의 타당성을 검증하였다.

2. 횡하중을 받는 FRP 적층 원통관으로 보강된 원형교각의 탄성해석

본 연구는 겹침이음이 있는 기존 원형교각에 대한 FRP 적층 원통관의 내진보강효과에 관한 것으로서, 지진이 발생할 경우 보강된 원형교각의 지진에 의한 횡하중-변위 관계를 이론적으로 검토하였다. FRP 적층 원통관의 원형교각에 대한 구속응력을 구하는 이론식을 탄성해석으로부터 유도하였으며, FRP 원통관의 구속응력과 원형교각의 철근과 콘크리트의 부착응력과 슬립변위와의 관계를 유도하여 지진에 의한 횡하중이 교각 상단에 작용할 경우, 그 하중에 따른 횡방향 변위를 구하였다.

2.1 FRP 적층 원통관의 구속응력

본 연구에서는 FRP 적층 원통관의 탄성해석에 관한 기본 가정 이외에 다음과 같은 추가적인 가정을 설정하였다.

- (1) 콘크리트와 FRP 적층 원통관은 완전 일체로 거동한다.
- (2) FRP 적층 원통관의 설치 위치는 일정하다.
- (3) 구속응력은 유효원주변형률(ϵ_j)을 일으키는 내력이다.

Fig. 1은 해석에 사용된 FRP 적층 원통관의 좌표계 및 작용하는 응력을 나타낸 것이다. 1, 2, 3은 FRP 적층 원통관의 재료의 물성을 나타내기 위한 방향을 의미하는 것으로서 1방향은 FRP의 섬유방향을, 2방향은 FRP의 섬유방향의 직각방향을, 3방향은 FRP의 두께방향을 의미한다. 섬유배향각(ϕ)은 원통관 표면에서의 교각 길이방향과 1방향이 이루는 각이며, R_i 는 기존 교각의 반지름인 원통관 내면의 반지름이고, R_o 는 원통관 외면의 반지름이다.

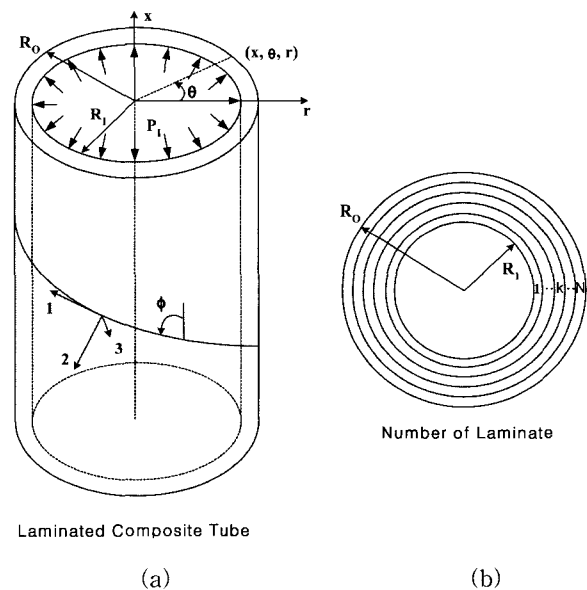


Fig. 1 Coordinates and number of laminated tube

Fig. 1(b)는 N 겹 적층한 FRP 적층 원통관을 나타낸 것으로서 k 는 FRP 적층 원통관의 k 번째 층을 의미한다. p_I 는 FRP 적층 원통관에 유효원주변형률이 발생할 때의 구속응력을 의미한다.

2.1.1 FRP 단층 원통관

Fig. 1과 같은 원통관의 미소요소에서 x 축 방향, 원주방향, 반경방향으로 발생한 미소변위를 각각 $u(x, \theta, r)$, $v(x, \theta, r)$, $w(x, \theta, r)$ 라고 하면, 압력을 받는 원통관의 탄성론에 의한 변형률-변위 관계는 다음과 같이 정의된다⁵⁾.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1a), \quad \epsilon_\theta = \frac{w}{r} \quad (1b)$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial w}{\partial r} \quad (1c), \quad r_{\theta r} = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \quad (1d)$$

$$r_{xr} = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (1e), \quad r_{\theta x} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1f)$$

보강섬유가 부재축과 섬유배향각만큼 기울어진 방향으로 배치된 직교이방성재료의 변형률-응력 및 응력-변형률 관계는 각각 다음과 같다⁸⁾.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_\gamma \\ \gamma_{\theta r} \\ \gamma_{xr} \\ \gamma_{\theta x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & 0 & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & \bar{C}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{36} & 0 & 0 & \bar{C}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \sigma_\gamma \\ \tau_{\theta r} \\ \tau_{xr} \\ \tau_{\theta x} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \sigma_\gamma \\ \tau_{\theta r} \\ \tau_{xr} \\ \tau_{\theta x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{13} & 0 & 0 & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{23} & 0 & 0 & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{13} & \bar{S}_{23} & \bar{S}_{33} & 0 & 0 & \bar{S}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{44} & \bar{S}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{45} & \bar{S}_{55} & 0 \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{36} & 0 & 0 & \bar{S}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_\gamma \\ \gamma_{\theta r} \\ \gamma_{xr} \\ \gamma_{\theta x} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, \bar{C}_{ij} 및 \bar{S}_{ij} 는 i 행, j 열의 연성행렬 및 강성행렬 각 요소를 나타낸다.

압력을 받아 변형된 FRP 적층 원통관의 미소요소에 작용하는 응력을 r 방향, θ 방향, x 방향에 대한 힘의 평형 조건을 적용하여 구하면 다음과 같은 미분방정식을 유도할 수 있다⁹⁾.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial x} = 0 \quad (4a)$$

$$\frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta x}}{\partial x} + \frac{2}{r} \tau_{\theta r} = 0 \quad (4b)$$

$$\frac{\partial \tau_{xr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta x}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \tau_{xr} = 0 \quad (4c)$$

반경방향으로 일정한 변형률이 발생하는 축대칭 원통관 일 경우 응력은 x, θ 와 독립이므로 위의 편미분방정식은

r 에 대한 상미분방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r + \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (5a),$$

$$\frac{d\tau_{\theta r}}{dr} + \frac{2}{r} \tau_{\theta r} = 0 \quad (5b), \quad \frac{d\tau_{xr}}{dr} + \frac{1}{r} \tau_{xr} = 0 \quad (5c)$$

단층 원통관의 변위는 다음과 같다.

$$u(x, r) = \epsilon_x^0 x - \bar{C}_{45} \frac{J}{r} + \bar{C}_{55} K \ln r \quad (6a)$$

$$v(x, r) = r^0 x r - \frac{\bar{C}_{44} J}{2r} - \bar{C}_{45} K \quad (6b)$$

$$w(r) = A_1 r^\lambda + A_2 r^{-\lambda} + \left(\frac{\bar{S}_{12} - \bar{S}_{13}}{\bar{S}_{33} - \bar{S}_{22}} \right) \epsilon_x^0 r^2 + \left(\frac{\bar{S}_{26} - 2\bar{S}_{36}}{4\bar{S}_{33} - \bar{S}_{22}} \right) \gamma^0 r^2 \quad (6c)$$

여기서, $\lambda = \sqrt{\bar{S}_{22} / \bar{S}_{33}}$,

J, K : 각각 전단응력과 관계된 적분상수,

r^0 : 단위길이당의 회전각,

ϵ_x^0 : x 축 방향의 단위길이당의 변형률

p_I 는 콘크리트 부분의 팽창으로 인해 FRP 적층 원통관에 발생하는 유효원주변형률 0.001이 발생했을 때 콘크리트 표면에 작용하는 FRP 적층 원통관의 구속응력이다. 유효원주변형률(즉, $\epsilon_j = 0.001$)은 Priestley 등³⁾이 제안한 것으로, 원주변형률이 0.001을 넘어서면 변형률이 급격히 증가하므로 구속응력을 상실한 것으로 가정하고 있다. 따라서 본 연구에서도 그 값을 원통관의 원주변형률의 한계 값으로 사용하였다. 내부표면에 압력 $\sigma_r = -p_I$ 를 받는 원통관인 경우 콘크리트와 FRP 관의 경계면에서 FRP 관의 경계조건은 다음과 같다.

$$\sigma_r(R_I) = -p_I, \quad (7a)$$

$$\text{내부표면}(r=R_I) : \tau_{\theta r}(R_I) \cong 0, \quad (7b)$$

$$\tau_{xr}(R_I) \cong 0 \quad (7c)$$

$$\sigma_r(R_O) = 0, \quad (8a)$$

$$\text{외부표면}(r=R_O) : \tau_{\theta r}(R_O) \cong 0, \quad (8b)$$

$$\tau_{xr}(R_O) \cong 0 \quad (8c)$$

$$\text{변형률} : \epsilon_x^0 \cong 0 \quad (9a), \quad \gamma^0 \cong 0 \quad (9b)$$

위의 경계조건식에서 전단응력이 모두 '0'이라고 하였으므로, 전단응력과 관계된 적분상수(J, K)는 '0'이다. x 방

향으로 일정한 변형률 및 단위길이당의 회전각도 '0'이 된다. 식 (6a)-(6c)에서 경계조건식을 대입하여 정리하면 식 (10a)가 구해지며, 외부응력이 '0'이라는 조건식 (8a)를 적용하면 식 (10b)가 얻어진다.

$$A_1 r_o^\lambda + A_2 r_o^{-\lambda} = w(r_o + \Delta r) \quad (10a)$$

$$(\bar{S}_{23} + \lambda \bar{S}_{33})A_1 r_o^{\lambda-1} + (\bar{S}_{23} - \lambda \bar{S}_{33})A_2 r_o^{-\lambda-1} = 0 \quad (10b)$$

위 식에서 $w(r)$ 은 유효원주변형률($\Delta r/r=0.001$)로부터 구하며, 위 두 식을 A_1, A_2 에 대해 연립해서 풀면 FRP 단층 원통관의 내압은 다음과 같이 구해진다.

$$-p_I = (\bar{S}_{23} + \lambda \bar{S}_{33})A_1 r_I^{\lambda-1} + (\bar{S}_{23} - \lambda \bar{S}_{33})A_2 r_I^{-\lambda-1} \quad (11)$$

식 (11)에서 구속응력(p_I)의 부호(-)는 작용하중의 방향을 나타내는 것으로서 Fig. 1에 표기된 응력 방향과 반대 방향으로 하중이 작용하는 것을 의미하며, A_1 과 A_2 는 앞의 식 (10a)와 식 (10b)로부터 구한 값이다.

2.1.2 FRP 적층 원통관

적층 원통관의 탄성거동해석은 단층 원통관의 탄성거동 해석에 각 층 재료의 역학적 성질 및 각 층의 경계면에서의 응력과 변위의 연속조건을 고려하여 구할 수 있다. 만약 N 층의 원통관이라 하면 미지수는 $A_1^{(k)}, A_2^{(k)}$ ($k=1, 2, \dots, N$)가 된다. 단층 원통관 해석으로부터 구한 변위를 사용하여 k 번째 층의 변위를 나타내면 다음과 같다.

$$u^{(k)}(x, r) = \varepsilon_x^{(k)} x - \bar{C}_{45}^{(k)} \frac{E^{(k)}}{r} + \bar{C}_{55}^{(k)} F^{(k)} \ln r \quad (12a)$$

$$v^{(k)}(x, r) = \gamma^{(k)} x r - \frac{\bar{C}_{44}^{(k)} E^{(k)}}{2r} - \bar{C}_{45}^{(k)} F^{(k)} \quad (12b)$$

$$w^{(k)}(r) = A_1^{(k)} r^\lambda + A_2^{(k)} r^{-\lambda} + \left(\frac{\bar{S}_{12} - \bar{S}_{13}}{\bar{S}_{33} - \bar{S}_{22}} \right) \varepsilon_x^{(k)} r + \left(\frac{\bar{S}_{26} - 2\bar{S}_{36}}{4\bar{S}_{33} - \bar{S}_{22}} \right) \gamma^{(k)} r^2 \quad (12c)$$

각 층과 층 사이의 경계면에서 하중 및 변위(또는 응력과 변형률)는 연속이어야 하므로 $\tau_{\theta r}^{(k)} = \tau_{rx}^{(k)}, \varepsilon_x^{(k)} = \varepsilon^o, \gamma^{(k)} = \gamma^o$ 인 관계가 성립한다. 내부표면에 $\sigma_r = -p_I$ 를 받는 FRP 적층 원통관의 경우 FRP 원통관과 콘크리트의 경계면에서 FRP관의 경계조건은 다음과 같다.

$$\sigma_r^{(1)}(R_I) = -p_I, \quad (13a)$$

$$\text{내부표면}(r=R_I) : \tau_{\theta r}^{(1)}(R_I) \cong 0, \quad (13b)$$

$$\tau_{xr}^{(1)}(R_I) \cong 0 \quad (13c)$$

$$\sigma_r^{(N)}(R_O) = 0, \quad (14a)$$

$$\text{외부표면}(r=R_O) : \tau_{\theta r}^{(N)}(R_O) \cong 0, \quad (14b)$$

$$\tau_{xr}^{(N)}(R_O) \cong 0 \quad (14c)$$

$$\text{변형률} : \varepsilon_x^{(k)} \cong 0, \quad (15a)$$

$$\gamma^{(k)} \cong 0 \quad (15b)$$

$$\text{연속조건} : w^{(k)} = w^{(k+1)}, \quad (16a)$$

$$\sigma_r^{(k)} = \sigma_r^{(k+1)} \quad (16b)$$

식 (12a), (12b), (12c)에 경계조건식을 적용하여 단층 원통관의 경우에서와 같은 방법으로 정리하고, 각 층과 층 사이의 경계면에서의 연속조건식 (16a), (16b)를 적용하면 다음과 같다.

$$w(r_o^{(k)} + \Delta r^{(k)}) = A_1^{(k)} r_o^{\lambda^{(k)}} + A_2^{(k)} r_o^{-\lambda^{(k)}} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} & (\bar{S}_{23}^{(k+1)} + \lambda^{(k+1)} \bar{S}_{33}^{(k+1)}) A_1^{(k+1)} r_I^{\lambda^{(k+1)}-1} \\ & + (\bar{S}_{23}^{(k+1)} - \lambda^{(k+1)} \bar{S}_{33}^{(k+1)}) A_2^{(k+1)} r_I^{-\lambda^{(k+1)}-1} \\ & = (\bar{S}_{23}^{(k)} + \lambda^{(k)} \bar{S}_{33}^{(k)}) A_1^{(k)} r_o^{\lambda^{(k)}-1} \\ & + (\bar{S}_{23}^{(k)} - \lambda^{(k)} \bar{S}_{33}^{(k)}) A_2^{(k)} r_o^{-\lambda^{(k)}-1} \end{aligned} \quad (17)$$

위 두 식을 $A_1^{(k)}, A_2^{(k)}$ 에 대해 연립해서 풀면, k 번째 층의 FRP 원통관의 내압은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} -p_I^{(k)} = & (\bar{S}_{23}^{(k)} + \lambda^{(k)} \bar{S}_{33}^{(k)}) A_1^{(k)} r_I^{\lambda^{(k)}-1} \\ & + (\bar{S}_{23}^{(k)} - \lambda^{(k)} \bar{S}_{33}^{(k)}) A_2^{(k)} r_I^{-\lambda^{(k)}-1} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에 의해 구해진 내압($p_I^{(k)}$)은 FRP k 층 원통관의 구속응력을 의미한다. 구속응력의 부호(-)는 하중 방향을 나타내는 것으로 Fig. 1에 표시된 응력 방향과 반대 방향으로 하중이 작용하는 것을 의미한다. FRP N 층으로 적층된 원통관의 구속응력은 각 층의 구속응력을 계산한 후 전체를 더하면 구할 수 있다. 즉, 각 층의 구속응력 $p_I^{(k)}$ 를 모두 더해줌으로써 N 층으로 적층된 FRP 원통관의 구속응력을 구할 수 있다.

2.2 FRP 적층 원통관의 구속응력과 원형교각의 철근과 콘크리트의 부착응력과의 관계

구속응력과 부착응력의 관계 및 철근의 부착응력과 슬립변위의 관계를 검토하여 보면 다음과 같다.

횡하중에 의한 콘크리트와 철근의 부착응력(τ_b)과 슬립 변위(S_b)의 관계는 Popovics⁷⁾의 식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_b = \frac{\left\{ \tau_{bc} \gamma \left(\frac{S_b}{S_{bc}} \right) \right\}}{\left\{ \gamma - 1 + \left(\frac{S_b}{S_{bc}} \right)^\gamma \right\}} \quad (19)$$

여기서, τ_{bc} 은 철근과 구속된 콘크리트 사이의 부착응력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{bc} = \tau_{bo} + 1.4d_I \quad (20)$$

위 식에서 $1.4d_I$ 는 구속응력에 따른 부착응력의 증가분이며, 상수 1.4는 ACI 318-89에서 제시한 전단마찰상수이다. 또한, τ_{bo} 는 보통콘크리트의 부착응력으로서 ACI 408.1R-90로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{bo} = \frac{20\sqrt{f_{ck}}}{d} \quad (21)$$

여기서, f_{ck} : 콘크리트 설계기준압축강도 (단위: kgf/cm²)
 d : 주철근의 지름 (단위: mm)

S_{bc} 는 구속되었을 경우의 슬립변위이며, γ 는 실험으로부터 구한 그래프에 의해 결정되는 상수 γ_o 를 이용하여 구한 값이다. Giuriani 등⁴⁾의 뽑힘시험(pullout test)에서 구한 실험식으로부터 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$S_{bc} = S_{bo} \left(1 + \alpha \frac{d_I}{f_{ck}} \right) \quad (22), \quad r = r_o - k_r \frac{d_I}{f_{ck}} \quad (23)$$

여기서, $\alpha = 75.0$, $r_o = 2.0$, $k_r = 13.0$

부착응력과 슬립과의 관계식으로부터 슬립변위에 따른 부착응력을 구할 수 있다. 부착응력은 구조물에서는 인장응력이므로 근사적으로 이 인장응력을 유발하는 횡하중으로 계산할 수 있으며, 슬립변위도 근사적으로 횡변위로 계산할 수 있다.

3. 결과의 비교 및 분석

3.1 횡방향 하중을 받는 FRP 적층 원통관으로 보강된 원형교각 실험

본 장에서는 겹침이음된 콘크리트 원형교각에 대해 FRP 적층 원통관으로 내진보강한 Xiao 등¹¹⁾의 실험결과와 본 연구에서 수행한 이론적 해석결과를 비교, 검토하였다.

기존 원형교각의 내진성능 향상을 위한 FRP 보강에 대한 이론적 연구

Xiao 등¹¹⁾의 실험내용을 보면, 실제 사용중인 교각을 대상으로 50% 축소모형체 3개를 제작하여 실험하였으며, 실험체의 제원은 Fig. 2와 같다. 첫 번째 교각은 비보강 교각에 대한 것이고, 두 번째 교각은 4겹, 세 번째 교각은 5겹으로 FRP를 적층하여 제작한 원통관으로 보강하였다.

실험체 교각의 높이는 2,642 mm이고, 겹침이음 길이는 381 mm이며, 콘크리트 피복두께는 38 mm, 교각의 지름은 610 mm이다. 띠철근(D6)은 127 mm간격으로 21개를 배근하였으며, 종방향의 주철근(D19)은 20개를 배근하였다. 실험에 사용된 철근의 항복강도 f_y 는 462 MPa 이며 콘크리트의 설계기준압축강도 f_{ck} 는 44.8 MPa 이다. 이 실험은 교각 자체의 파괴거동에 대한 연구이므로 교각의 기초가 먼저 파괴되지 않도록 하기 위하여 기초는 충분한 강성을 가질 수 있도록 설계되었다.

FRP 보강재는 미리 제작되어진 반원모양의 재킷형식으로 유리섬유(E-glass)와 에폭시 수지로 만들었으며, 각 층의 두께는 3.2 mm이었다. 실험에 사용된 재료의 역학적 성질은 Table 1과 같다.

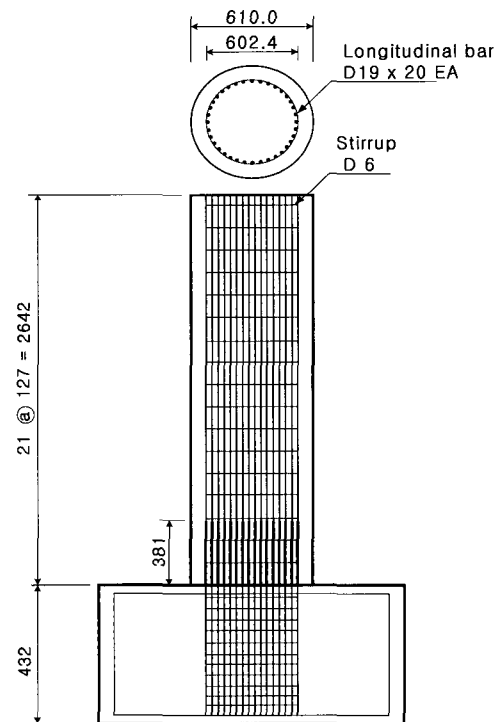


Fig. 2 Model column details (unit : mm)

Table 1 Mechanical properties of FRP

Elastic modulus		Poisson ratio		Shear elastic modulus	
Sign	Value	Sign	Value	Sign	Value
E ₁₁	47.2GPa	ν_{12}	0.25	G ₁₂	10GPa
E ₂₂	5GPa	ν_{23}	0.125	G ₂₃	2GPa
E ₃₃	3GPa	ν_{13}	0.025	G ₁₃	0.5GPa

3.2 결과의 비교 및 분석

3.1절에서 설명한 Xiao 등¹¹⁾의 실험으로부터 얻은 횡하중-변위 관계와 본 연구에서 유도한 이론식에 의해 구한 횡하중-변위 관계를 비교, 분석하였다. 횡하중(P)에 따른 변위(δ)는 Fig. 3과 같다. Fig. 4는 FRP 적층 원통관으로 보강하지 않은 실험체 교각의 횡하중-변위 관계이며, Fig. 5, 6은 각각 4겹, 5겹으로 FRP를 적층하여 만든 원통관으로 보강한 교각의 횡하중-변위 관계이다. 그림에서 점으로 나타낸 값들은 실험결과이며 실선은 본 연구에서 제안하는 이론식에 의해 구한 것이다. 이론식에 의해 구한 횡하중-변위 관계는 부착응력과 슬립변위와의 관계식으로부터 부착응력 및 슬립변위를 구한 뒤, 부착응력은 횡하중으로 슬립변위는 횡변위로 다시 역으로 계산한 것이다. 그림으로부터 실험값이 근접한 값을 보이고 있으므로 제안한 식은 상당히 타당하다고 생각된다. 또한 Fig. 4는 최대 횡하중이 작용한 후 급격한 취성파괴 형태를 보이므로 지진이 발생할 경우 에너지 흡수능력이 급격히 떨어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5, 6으로부터, FRP 적층 원통관으로 보강한 교각에서는 최대 횡하중이 작용한 후에도 완만한 곡선을 이루며 연성파괴 거동을 하므로 지진이 발생할 경우 에너지 흡수능력이 커진다는 것을 알 수 있다.

4. 적층조건에 따른 내진보강 효과

교각에 있어서 FRP 적층 원통관이 발휘하는 구속응력은 FRP 적층 원통관에서 FRP의 적층수, 섬유배향각 및 역학적 성질 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 FRP 적층 원통관이 발휘하는 구속응력에 영향을 미치는 요인들을 검토하기 위해 매개변수 분석을 수행하고, 그에 따른 구속응력과의 관계 및 횡하중-변위 관계를 고

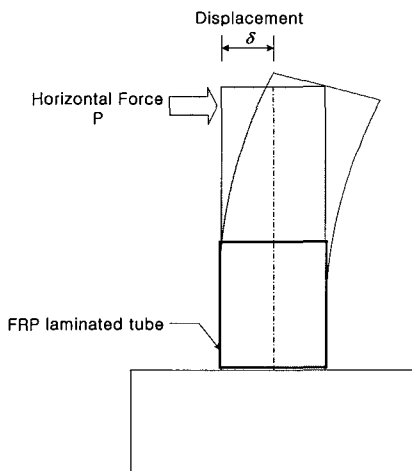


Fig. 3 Horizontal force (P) and displacement (δ)

찰하였다. 매개변수 분석에 사용된 교각 및 FRP 적층 원통관의 치수는 3장에서 설명한 실험에 사용된 것과 동일하게 적용하였다.

4.1 FRP 원통관의 적층수

접침이음이 존재하는 비내진 원형교각을 FRP 적층 원통관으로 보강하였을 경우 FRP 적층수에 따라 보강효과

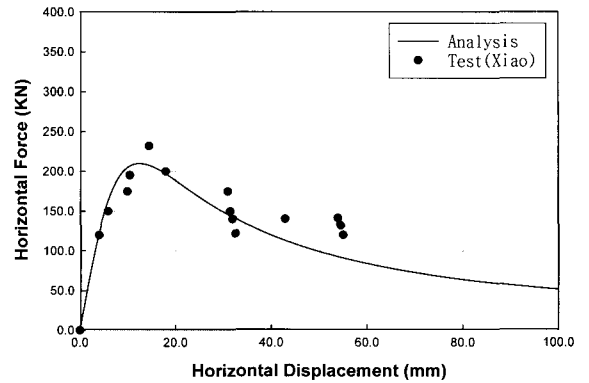


Fig. 4 Horizontal force and displacement relationship for existing columns

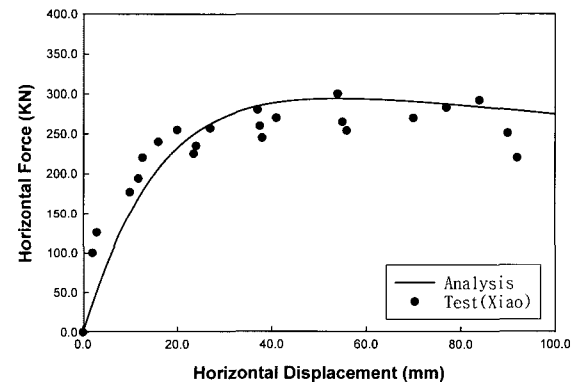


Fig. 5 Horizontal force and displacement relationship for retrofitted columns with 4-layer laminated tube

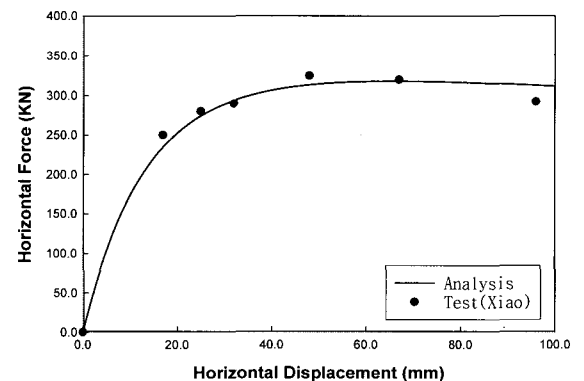


Fig. 6 Horizontal force and displacement relationship for retrofitted columns with 5-layer laminated tube

가 달라진다. 따라서 FRP 적층 원통관의 구속응력 계산식을 사용하여 적층수가 FRP 적층 원통관이 발휘하는 구속응력 및 횡하중-변위 관계에 미치는 영향에 대해 조사하였다. Fig. 7은 FRP 적층 원통관의 적층수 증가에 따른 구속응력의 변화를 나타낸 것으로서 적층수와 구속응력은 선형비례함을 알 수 있었다. Fig. 8은 FRP 적층 원통관의 적층수를 변화시켰을 경우 횡하중과 변위의 관계를 나타낸 것이다. FRP 적층 원통관으로 인한 구속응력은 콘크리트와 철근의 부착응력을 증진시키므로 Fig. 8과 같이 횡하중이 증가하였다. 또한, 적층수가 증가함에 따라 취성과 파괴에서 연성파괴 형태로 파괴거동이 변화하였으며, 이는 지진이 발생할 경우 에너지 흡수면에서 바람직한 거동이라고 할 수 있다. FRP를 8겹으로 적층한 원통관으로 보강한 교각인 경우 부착응력-변위 관계곡선은 Popovics⁷⁾가 제안한 식에서 γ 가 1이상이어야 하는 조건 때문에, FRP를 8겹 이상으로 적층하여 원통관을 제작한 경우 이 제안식은 적절히 수정되어야 한다고 생각된다.

4.2 FRP 원통관의 보강섬유 배치 방향

보강섬유의 배향각이 FRP 적층 원통관의 보강효과에 미치는 영향에 대해 고찰하여 보면 다음과 같다.

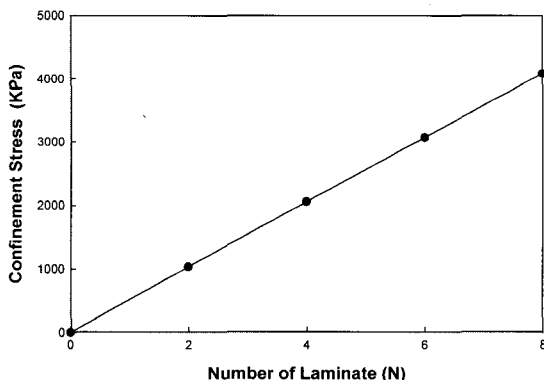


Fig. 7 Variation of confinement stress by no. of layer laminated tube

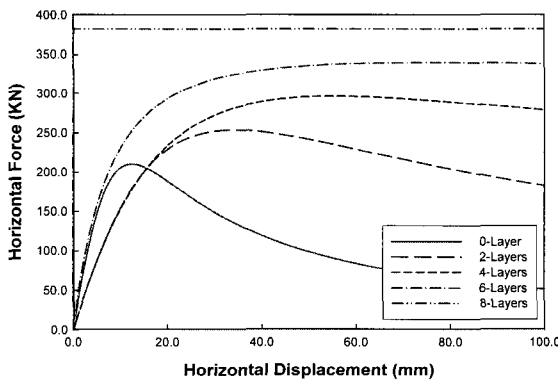


Fig. 8 Horizontal force and displacement relationship by no. of layer laminated tube

Fig.9는 FRP 적층 원통관의 섬유배향각에 따른 구속응력의 변화를 나타낸 것으로서 섬유배향각과 구속응력은 포물선 관계였으며, 섬유배향각이 교각의 길이방향 축에 대해서 90°일 때 가장 큰 구속응력을 보임을 알 수 있다. Fig.10은 FRP 적층 원통관의 섬유배향각에 따른 횡하중과 변위의 관계를 나타낸 것이다. 배향각이 90°에 근접할수록 FRP 적층 원통관으로 인한 구속응력은 부착응력의 증진을 가져오므로 결과적으로 Fig.10과 같이 횡하중이 증가하였다.

4.3 FRP 원통관의 역학적 성질

원통관의 역학적 성질의 변화가 내진보강에 주는 효과를 검토하였다. Fig.11은 FRP 적층 원통관의 역학적 성질 중 E_{11} 을 변수로 하였을 경우 E_{11} 과 구속응력의 관계를 나타낸 것이고, Fig.12는 E_{11} 을 변화시켜가며 횡하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 또한 E_{11} , E_{22} , ν_{12} , G_{12} 를 각각 변수로 하였을 경우 각 변수에 따른 구속응력의 변화를 조사하였다. 변수의 80%, 90%, 100%, 110%, 120%의 5가지로 $\pm 20\%$ 이내에서 변화시킨 경우에 대하여 고찰하였다. E_{11} 과 구속응력은 선형비례 관계로 나타났으며, 그에 따른 최대 횡하중의 크기도 비례함을 알 수 있었다. E_{22} , ν_{12} , G_{12} 와 구속

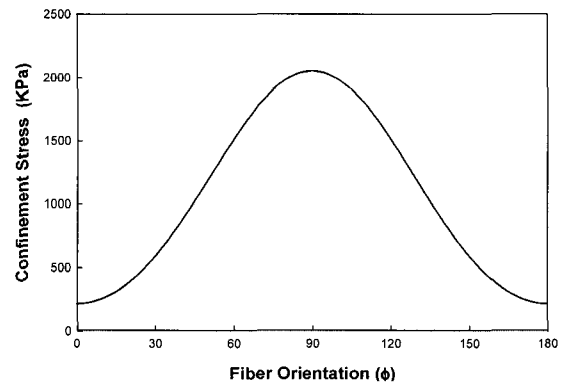


Fig. 9 Variation of confinement stress by fiber orientation

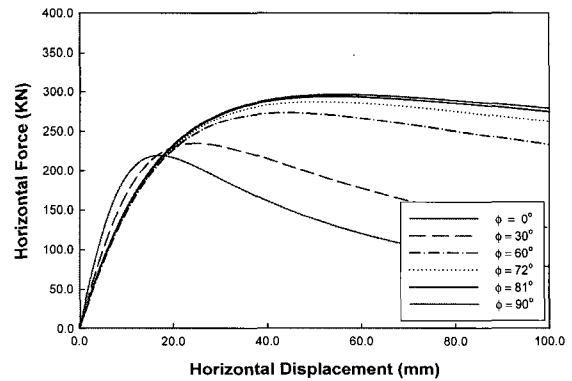


Fig. 10 Horizontal force and displacement relationship by fiber orientation

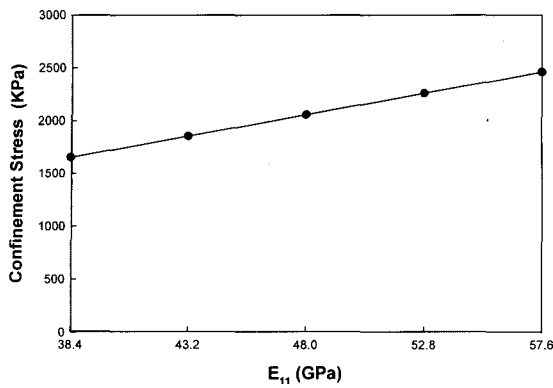


Fig. 11 Variation of confinement stress by E_{11}

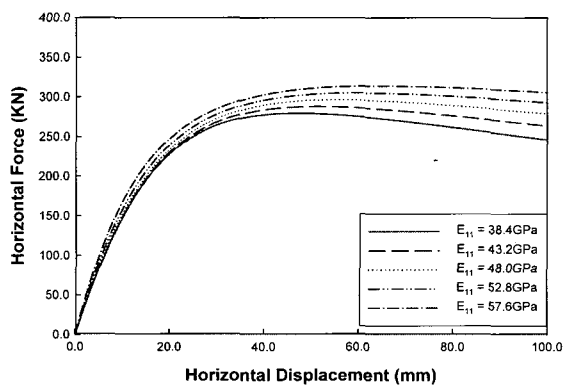


Fig. 12 Horizontal force and displacement relationship by E_{11}

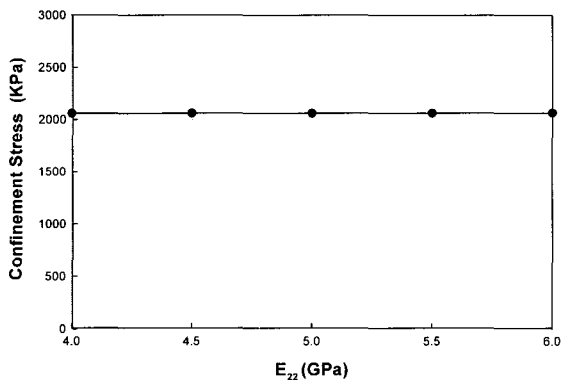


Fig. 13 Variation of confinement stress by E_{22}

응력의 변화관계는 약간의 증감은 있으나 유사하였다. 위의 결과로부터 FRP 적층 원통관으로 원형교각을 보강할 경우 적층수, 섬유배향각, E_{11} 이 교각의 내진보강효과에 미치는 영향이 지배적임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 내진설계가 되어 있지 않고 접침이음을 가지는 철근콘크리트 원형교각을 FRP 적층 원통관으로

보강한 경우, FRP 원통관이 발휘하는 구속응력을 예측하는 이론식을 유도하였으며, 이론식에 의한 구속응력은 Xiao 등¹¹⁾이 수행한 실험결과와 비교하였다. 비교한 결과 이론식에 의해 예측한 결과는 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다. 또한 FRP 적층 원통관을 사용한 효과적인 내진보강 설계를 위해 이론식을 사용하여 구속응력에 대해 영향이 큰 변수들에 대한 매개변수해석을 추가적으로 수행하였다. 이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) FRP 적층 원통관으로 보강한 원형교각에서 유효원주 변형률($\epsilon=0.001$)일 때 FRP 적층 원통관의 탄성기동해석으로부터 구속응력을 계산하는 식은 타당함을 확인하였다.
- 2) FRP 적층 원통관이 발휘하는 내진보강효과 중 구속응력을 계산하는 이론식을 사용하여 구속응력에 영향을 주는 매개변수들에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과 FRP 적층 원통관으로 보강할 경우 적층수, 섬유배향각, 섬유보강방향의 탄성계수(E_{11})가 내진보강효과에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다.
- 3) FRP 적층 원통관으로 보강하는 경우, 횡하중-변위 곡선으로부터 알 수 있듯이 지진하중이 작용할 때 에너지 흡수능력이 증가하며, 따라서 연성 파괴모드를 기대할 수 있다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1989.
2. ACI Committee 408, "State-of-the-Art Report on Bond under Cyclic Loads," Report ACI 408.2R-92, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1992.
3. Chai, Y. H., Priestley, M. J. N., and Seible, F., "Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhancing Flexural Performance," *ACI Structural Journal*, ACI, Vol.88, No.5, 1991, pp.572~584.
4. Giuriani, E., Plizzari, G., and Schumm, C., "Role of Stirrups and Residual Tensile Strength of Cracked Concrete on Bond," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117, No.1, 1991, pp.1~18.
5. Herakovich, C. T., "Mechanics of Fibrous Composites," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998, pp.362~401.
6. Matsuda, T., Sato, H., Fujiwara, H., and Higashira, N., "Effect of Carbon Fiber Reinforcement as a Strengthening Measure for Reinforced Concrete Bridge Piers," *Proceedings of 1st U.S.-Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges*, 1990.

7. Popovics, S., "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.3, No.5, 1973, pp.583~599.
8. Reddy, J. N., "*Mechanics of Laminated Composite Plates Theory and Analysis*," CRC Press, New York, 1997.
9. Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., and Li, M. W., "Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps," *ACI Structural Journal*, ACI, Vol.91, No.2, 1994, pp. 434~448.
10. Seible, F., Hegemier, G. A., and Innamorato, D., "Developments in Bridge Column Jacketing Using Advanced Composites," *Proc., Nat. Seismic Conf. on Bridges and Hwy.*, Federal Highway Administration and California Department of Transportation, USA, 195pp.
11. Xiao, Y. and Ma, R., "Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.10, 1997, pp.1357~1364.
12. Seible, F. and Priestley, M. J. N., "Retrofit of Rectangular Flexural Columns with Composite Fiber Jackets," *Proc., 2nd Annu. Seismic Res. Workshop*, 1993.
13. 건설교통부, "사회기반 시설물의 내진성능향상 기술 개발", 한국건설기술연구원, 2000, pp. 214 ~ 329.
14. 시설안전기술공단, "기존교량의 내진보강 방안 연구", 한국지진공학회, 1999, pp.266~310.

요 약

신설교량의 경우 최근 개정된 도로교설계기준에 의해 내진설계를 수행하여 시공되었으나, 내진설계규정이 적용되기 이전에 시공되어 사용중에 있는 철근콘크리트 교각의 경우에는 지진에 의한 횡하중에 대해 취약할 수 있다. 특히 형상비가 큰 기존 교각에서는 기초와 교각 접합부에 주철근 겹침이음이 존재하므로 지진이 발생할 경우 피복콘크리트 파손에 따른 부착파괴 형태의 급격한 취성파괴 거동을 나타낸다. 이러한 부착파괴가 일어나는 소성힌지 구간에 FRP 적층 원통관으로 보강하여 부착강도를 크게 함으로써 횡하중에 대한 급격한 파괴를 예방할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FRP 적층 원통관으로 보강된 원형 교각에서 FRP 적층 원통관이 주는 구속효과를 효과적으로 산정하기 위한 이론식을 유도하여 제안하고자 하였다. 이를 위해 FRP 적층 원통관이 철근콘크리트 원형교각에 발생시키는 구속응력을 이론적으로 유도하여 제안하였으며, 제안된 식의 타당성을 검증하기 위해 기존의 타 연구에서 수행한 실험결과와 비교, 검토하였다. 또한 다양한 FRP 적층조건에 따른 구속응력의 변화를 고찰하기 위한 매개변수 연구를 수행하였다. 이와 같은 연구를 통해 본 연구에서 제안하는 식이 FRP 적층 원통관을 이용하여 보강한 기존 원형교각의 거동을 잘 예측할 수 있음을 확인하였으며, 적층수, 섬유배향각, 섬유방향의 탄성계수가 FRP 적층 원통관에 의한 내진보강효과에 가장 지배적인 매개인자임을 알 수가 있었다.

핵심용어 : 기둥, 겹침이음, 지진, FRP