

FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 변위계수법에 의한 내진성능설계기법 개발

조창근^{1)*} · 하기주²⁾ · 배수호³⁾

¹⁾경북대학교 건설공학부, BK21 미래지향 글로벌 방재 전문인력 양성 사업단 ²⁾경일대학교 건축학부 ³⁾안동대학교 토목공학과

Development of Performance-Based Seismic Design of RC Column Using FRP Jacket by Displacement Coefficient Method

Chang-Geun Cho^{1)*}, Gee-Joo Ha²⁾, and Su-Ho Bae³⁾

¹⁾BK21, School of Architecture and Civil Eng., KyungPook National University, Daegu 702-701, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Kyungil University, Daegu 712-904, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

ABSTRACT In the current research, the scheme of displacement-based seismic design for seismic retrofit of concrete structures using FRP composite materials has been proposed. An algorithm of the nonlinear flexural analysis of FRP composite concrete members has been presented under multiaxial constitutive laws of concrete and composite materials. An algorithm for performance-based seismic retrofit design of reinforced concrete columns with FRP jacket has been newly introduced to modify the displacement coefficient method used in reinforced concrete structures. From applications of retrofit design, the method are easy to apply in the practice of retrofit design and give practical prediction of nonlinear seismic performance evaluation of retrofitted structures.

Keywords : FRP jacket, displacement coefficient method, displacement-based seismic design, seismic retrofit of concrete

1. 서 론

90년대에 발생한 일본의 효고현 남부 지진 (고베지진) 및 미국의 Northridge 지진 (LA지진)에 의한 대도시 건축물 및 사회기반시설의 피해는 구조물의 내진설계에 관한 새로운 관점의 필요성을 자각시켰다. 구조물에 대한 내진설계에서, 기존의 강도설계 개념에서 성능설계 개념으로의 필요성이 크게 부각되게 되었다. 1990년대 중반 이후 성능설계에 기반을 둔 내진설계 개념은 중간규모 이하의 지진에 대해서는 구조물이 전혀 손상을 입지 않는 선형탄성하의 거동을 하도록 설계하는 반면에, 강진 규모에 대해서는 일부 구조 부재의 비선형거동 및 손상을 허용하지만 구조물이 붕괴되지 않도록 유도하여 성능에 기반을 둔 설계가 이루어지도록 지향하게 되었다.

기존의 철근콘크리트 및 강골조 구조 부재에 대한 내진성능설계에 관한 연구는 1990년대 중반 이후 현재까지 꾸준히 성행하고 있으며 많은 진전을 가져왔다. 하지만, 신소재 FRP 복합재료 등을 활용한 새로운 구조 부재 시스템의 개발 및 기존 콘크리트 구조물에 대한 성능 개선된 FRP 콘크리트 구조물에 대한 내진성능설계에

관한 연구는 전 세계적으로 거의 진전되어 있지 않고 있다. 기존의 콘크리트 구조물에 비해 복합재료를 활용한 신소재 FRP 콘크리트 구조 부재 및 성능 개선된 FRP 콘크리트 구조 부재 시스템은 구조 부재의 내진 효과에 있어서 부재 휨 내력, 전단 및 연성 거동의 증진에 큰 효과가 있음이 이미 많은 연구들을 통해 입증되었다¹⁻⁵⁾.

한편, 내진성능설계를 위한 해석 기법은 효과적이면서도 실용 가능한 장점과 함께, 비선형성, 다자유도의 동적 특성 및 비선형거동에 따른 감쇠 효과 등을 합리적으로 반영해 줄 수 있으면서 실무자가 편리하게 설계에 적용할 수 있는 측면이 요구된다. 이를 위해서 비선형 정적 pushover 해석 방법이 여러 연구자들에 의해 제시되었다. 부재 비선형거동을 유효탄성계수법에 의해 단순화하여 철근콘크리트 기둥의 내진성능설계를 위한 단자유도 하에서의 변위-기반 설계법을 제시하였으며⁶⁾, 이 방법을 기초로 하여 다자유도 구조의 변위-기반 설계법이 제시되었다⁷⁾.

건축물의 지진에 대한 취약성을 평가하기 위한 방법으로서 역량 스펙트럼 방법 (capacity spectrum method, CSM)이 최초로 제시되었다⁸⁾. Pushover 해석에 의해 산정된 구조물의 역량인 공급 곡선이 선형 응답스펙트럼으로부터 산정된 요구 곡선과의 비교에 의해 목표로 하는 성능에 대한 설계 및 평가가 가능토록 하였다. 기존 역

*Corresponding author E-mail : chocg@knu.ac.kr
Received January 15, 2007, Accepted May 18, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

량 스펙트럼 방법을 개선하여 비탄성 요구 스펙트럼을 사용한 역량 스펙트럼 방법에 의한 내진성능설계 기법이 제시되어⁹⁾, 다자유도의 철근콘크리트 빌딩 구조물에 적용되었다. 내진성능설계를 위한 역량 스펙트럼 방법에 의한 비선형 정적 pushover 해석 절차는 북미의 ATC-40 (1996)에서 채택되었다.

Newmark-Hall (1982)의 탄성 및 비탄성 설계 스펙트럼과 부재 비선형 관계를 등가 선형화하고, 소성비에 따른 감쇠비 관계를 고려하여, 철근콘크리트 구조 부재에 대한 직접 변위-기반 설계법 (direct displacement-based design method, DDM) 및 성능 평가 방법이 제시되었다¹¹⁾.

미연방재난관리국 (FEMA)은 빌딩 구조물에 대한 내진성능설계 및 성능 평가를 위한 방법으로서 변위계수법 (displacement coefficient method, DCM)을 채택하였다¹²⁾. 이 방법에서는 변위 요구값이 통계분석을 통해 얻어진 여러 가지 수정 계수들과 비탄성 변위 스펙트럼에 의해 산정되도록 하였다.

본 연구의 목적은, 복합재료를 활용한 성능 개선된 FRP 콘크리트 구조 부재를 사용한 합성 구조물에 대한 내진성능설계기법을 제안하고, 이를 통하여 콘크리트 구조물에 대한 초고층화 및 장경간화를 지향하는 보다 향상된 성능 개선 구조물의 해석 및 설계 기법을 소개 및 적용하는데 있다. 이를 위해 본 연구는 FRP 피복 보강에 의한 내진성능개선 콘크리트 부재에 대한 비선형 정밀 해석 기법을 적용, 변위-기반 내진성능설계 기법에 대한 설계 및 평가에 관한 상세 알고리즘을 제시토록 하였다. 이를 위해 기존의 철골 및 철근콘크리트 구조물에 적용된 변위계수법 DCM을 개선 보완하여, FRP 복합재료로 성능 개선된 콘크리트 부재에 대한 성능기반설계기법의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 변위계수법에 의한 내진성능설계의 추정

구조물의 변위-기반 내진성능설계 및 내진 평가를 위해 제시된, FEMA-273의 변위계수법 (DCM)에 의한 목표 변위값은 일반적으로 지진하중에 의한 구조물의 최상층부에서의 최대 변위값을 정의하는 것으로 다음 식으로 산정된다.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

여기서, S_a 는 구조물의 유효주기 T_e 에 대응하는 가속도 스펙트럼, g 는 중력가속도이며, $C_0 \sim C_3$ 값은 수정 계수값들로서 다음의 방법들에 의해 산정 된다. 이 경우 부재의 비선형 등가 정적 해석에 의해 산정된 횡하중 V 및 횡방향 변위 Δ 관계를 이원 선형으로 나타낼 경우 다음 Fig. 1과 같다. 여기서 K_e 는 유효강성, V_y 는 항복하중, Δ_y 는 항복변위를 나타낸다.

C_0 값은 다자유도 빌딩 구조물의 경우 최상층부 변위와 등가 단자유도 시스템간의 변위 차이를 나타내는 수정계

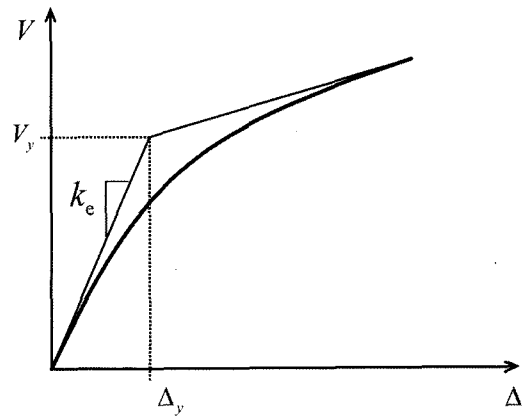


Fig. 1 Bilinear force-deformation and effective stiffness

수이다 (FEMA-273).

C_1 값은 다음 식에 의해 산정된다.

$$C_1 = 1.0, \quad T_e \geq T_o$$

$$C_1 = \frac{1.0 + (R-1)T_o/T_e}{R}, \quad T_e \leq T_o \quad (2)$$

여기서, T_o 는 지표면 운동의 특성 주기, R 은 구조물의 요구 탄성시에 대한 항복시의 강도비를 나타내는 것으로 다음 식과 같이 정의된다.

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} \frac{1}{C_0} \quad (3)$$

위 식에서 V_y 는 등가정적해석으로부터 구한 기초 항복 전단력, W 는 구조물의 무게이다.

C_2 값은 Table 1과 같이 성능 단계에 따라서 수정계수를 고려한다.

한편, 단주기 및 낮은 내력 하에서는 강성 및 강도 저하 현상의 경향을 나타낸다. 이를 반영하여, 항복 이후 강성이 양의 값이면 $C_3 = 1.0$ 으로 고려하며, 그렇지 못한 경우에는 항복 이후 강성비 α 로부터 다음과 같이 산정된다.

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \quad (4)$$

3. FRP 피복 RC 기둥의 비선형 총상화 힘 해석

변위-기반 내진성능설계를 위해서는 부재의 비선형 해석을 수행하여야 하며, 비선형해석 기법에 있어서도 고정밀도의 비선형 예측 방법이 성능 설계에서는 중요한 역할을 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 FRP 피복 보강 철근콘크리트

Table 1 Modification factor of C_2

Performance level	$T_e = 0.1 \text{ sec}$	$T_e > T_o \text{ sec}$
Immediate occupancy life	1.0	1.0
safety collapse prevention	1.3	1.1
	1.5	1.2

부재의 비선형 휨 거동 예측을 위하여, 본 연구 과정에서 개발한 FRP 층의 2차원 구성 관계 및 콘크리트의 3차원 구성 관계를 고려한 FRP 콘크리트의 압축 거동 예측 모델을 기초로^{1,13)}, Fig. 2와 같이 이를 확장한 비선형 휨 부재 해석 기법을 제시하였다. 제시된 비선형 휨 해석 알고리즘은 Fig. 3과 같다.

기존의 연구와 비교하여 본 해석 모델의 개선점 및 특징은, 콘크리트의 경우는 3차원의 다축 응력 구성 관계에 기초한 탄성 재료로 고려하여 다축응력상태 하에서 콘크리트의 구속 현상을 정식화하였으며, FRP 층의 경우는 2축 응력 상태에 기초한 FRP 복합재료의 2차원 구성 관계를 고려하도록 한 것이다. 단면에서의 FRP 재료와 콘크리트 사이의 이론적 적합 및 평형 조건을 고려하였다. 따라서 제안된 FRP 콘크리트의 구속 모델은 하중 및 변형에 의존적인 비선형적 구속 효과를 보다 합리적으로 고려하였다.

비선형 모멘트 및 곡률 관계로부터 기둥의 변위를 추

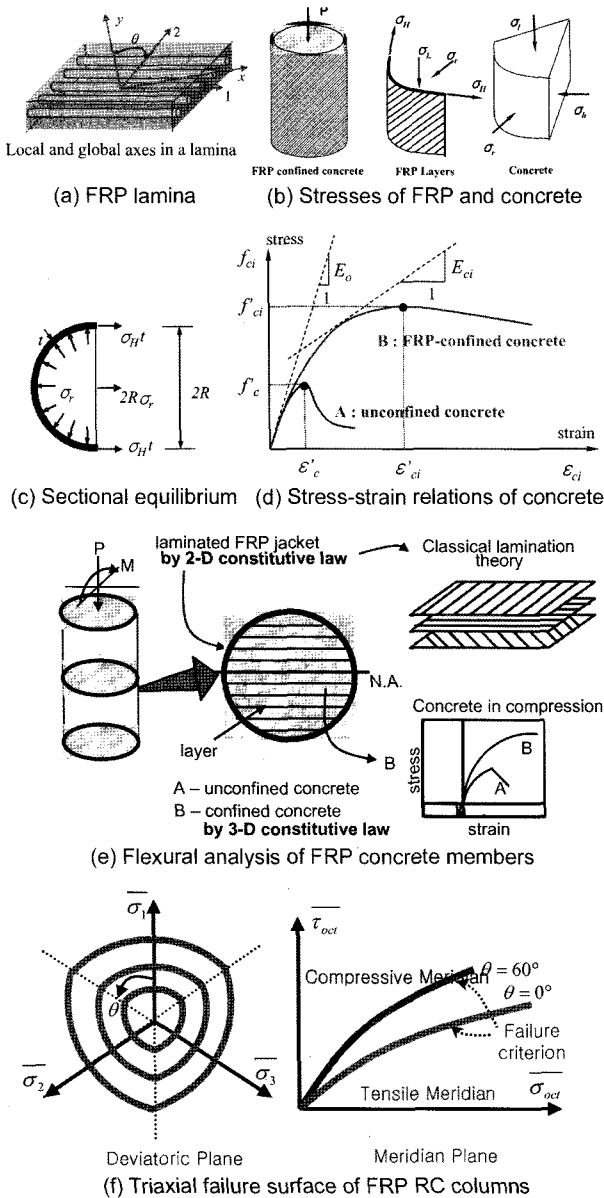


Fig. 2 Flexural model of FRP RC columns

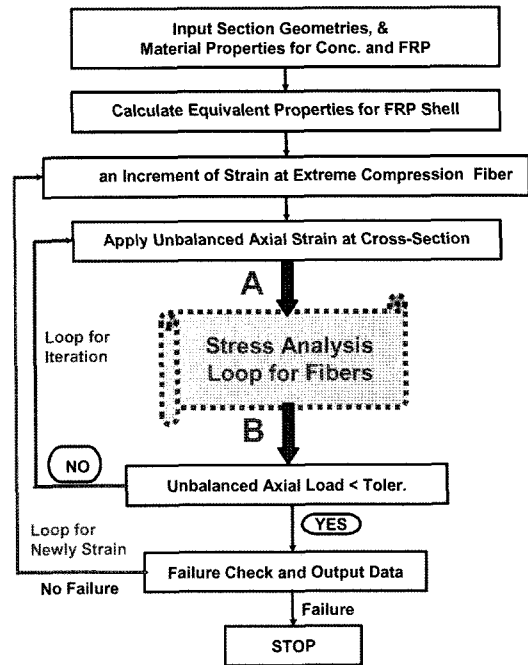


Fig. 3 Analysis algorithm of FRP RC members

정하기 위하여, FRP 피복 보강 기둥의 소성힌지 길이는 다음 식과 같이 고려하였다¹⁴⁾.

$$L_p = g + 0.044d_{lb}f_{yl} \quad (5)$$

여기서, g 는 피복층과 지점부의 간격, d_{lb} 및 f_{yl} 은 종방향 주철근 지름 및 항복응력이다.

유리 및 탄소섬유를 사용한 FRP로 구속된 콘크리트 실린더의 압축 거동 예측 및 보 부재의 휨 거동 예측 결과를 실험과 비교한 결과, 본 예측 모델은 FRP 구속 콘크리트의 압축강도, 축방향 및 횡방향 변형을 관계와 FRP 구속 콘크리트 구조 부재의 휨 내력, 모멘트-곡률 관계, 부재 단면에서의 축방향 및 횡방향 변형을 관계를 초기 하중 단계에서 극한 하중 단계에 이르는 전 하중 단계까지의 거동을 비교적 잘 예측해 주었다^{1,13,15,16)}.

4. 성능에 따른 FRP 보강 피복두께의 결정

4.1 휨 연성 보강에 필요한 FRP 피복두께

휨 연성 능력 향상에 필요한 FRP의 두께는 기둥의 단면 형상, 소요 휨 연성 능력, 구속 콘크리트의 압축강도 등을 고려하여 산정한다. 부재의 단면 형상에 따라 보강 효과가 다르게 나타나므로 단면 형상에 따라서 다음의 설계 방법에 따라 휨 연성 보강에 필요한 FRP의 두께를 산출할 수 있다.

원형 단면 기둥의 FRP 피복 보강 시, 단면 직경 D 인 경우, FRP 피복의 유효 체적비는 다음과 같다.

$$\rho_j = \frac{4t_j}{D} \quad (6)$$

구속된 콘크리트의 압축강도 f_{cc} 는 다음 식과 같다¹⁷⁾.

$$f'_{cc} = f_{ck} \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_c}} - \frac{2f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (7a)$$

여기서, f'_{cc} 는 콘크리트의 응력-변형률의 관계에서 최대 변형률 ϵ_{cc} 가 될 때의 응력이고, 유효 횡구속 응력 $f'_l = k_e f_{lu}$ 는 유효 구속 계수 k_e , FRP 층의 인장강도 f_{uj} 에 의한 다음의 횡구속응력 f_{lu} 에 의해 산정된다¹⁸⁾.

$$f_{lu} = \frac{2f_{uj}t_j}{D} \quad (7b)$$

FRP 피복 보강은 원형 단면 기둥의 휨 연성 보강 시 강관 보강보다 보강 효과가 뛰어나다. 이는 FRP 복합재료가 파괴전 거의 탄성체이기 때문이다. FRP 층의 탄성 계수가 E_j 인 경우, 극한변형률 ϵ_{uj} 는 파괴 도달까지 거의 선형탄성거동을 하므로 다음 식과 같다.

$$\epsilon_{uj} = \frac{f_{uj}}{E_j} \quad (8)$$

강관 보강의 경우에는 보강 강관이 항복하게 되면 하중이 제거되어도 강관에는 잔류 변형이 남아 다음 재하시의 구속 효과는 감소하게 되고 반복 재하에 따른 락철근의 변형률은 증가하게 된다. 그러나, 유리섬유나 탄소섬유에서는 재료가 파단될 때까지 응력-변형률의 관계는 탄성이고 손상이 누적되지 않아 동일 변위 진폭에 대한 재하에서도 락철근의 변형은 증가하지 않고 일정하다. 극한 압축변형률 ϵ_{cu} 는 다음 식과 같이 고려하였다¹⁹⁾.

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5\rho_j f_{uj} \epsilon_{uj}}{f'_{cc}} \quad (9)$$

여기서, ρ_j 는 식 (6)에 의해, f'_{cc} 는 식 7(a)에 의해 산정할 수 있다. 다만, 소성힌지 영역 내에 주철근의 겹침이 있는 경우에는 0.004를 0.002로 하여 산정토록 한다.

따라서, 휨 연성 보강에 필요한 FRP 보강 두께의 결정은, 식 (6)을 식 (9)에 대입하여 보강 두께 t_j 에 대해서 정리하면 다음과 같게 산정된다.

$$t_j = \frac{0.1(\epsilon_{cu}-0.004)Df'_{cc}}{f_{uj}\epsilon_{uj}} \quad (10)$$

4.2 전단 보강에 필요한 FRP 피복두께

기둥의 공칭전단강도가 초과 휨강도에 의하여 추정된 최대 전단강도보다 작은 경우에는 전단 저항능력을 보강하여야 한다.

기둥 부재의 내진성능 개선의 경우 전단강도는 신설 구조의 경우와 같이 확보하지 않아도 된다. 신설 구조와 달리 기존 기둥의 재료 특성은 알려져 있기 때문에 강도면에서 불확실성은 적다. 다만, 덧씌우는 보강관의 두께가 다소 변화하여도 내진보강에 소요되는 비용은 큰 차이가 없으므로 전단 보강 설계 시에는 신규 설계와 같은 여유를 확보하도록 하는 것이 좋다. 따라서 안전을

위하여 기둥의 소성힌지부 휨강도는 크게 평가하고 전단 강도는 상당량 작게 평가하는 것이 일반적이다.

보강 전의 기둥의 설계전단강도 $\phi_s(V_c + V_{sh} + V_p)$ 가 기둥의 휨강도 (초과 강도 적용)에 의하여 추정된 최대 전단강도 V^0 보다 작은 경우 보강해야 할 전단강도는 다음 식과 같다.

$$\phi_s V_{sj} \geq V^0 - \phi_s(V_c + V_{sh} + V_p) \quad (11)$$

여기서, ϕ_s 는 전단강도감소계수로 0.80, V_c 는 콘크리트에 의한 공칭전단강도, V_{sh} 는 전단철근에 의한 공칭전단강도, V_p 는 압축력에 의한 공칭전단강도이다.

콘크리트의 공칭전단강도는, Fig. 4와 같이, 변위소성도 μ 에 따른 감소계수 k 값에 의해 정의되며, 본 연구에서는 Priestley 등¹⁸⁾이 제안한 식을 고려하였다. 한편, Kowalsky 등⁶⁾에 의하면, 콘크리트의 전단강도는 변위소성도 이외에도 추가적으로 주철근비 및 휨모멘트-전단력 비에도 연관됨이 밝혀졌다. 이를 고려하여, 본 연구에서는 다음 식과 같이 적용하였다.

$$V_c = \alpha\beta k \sqrt{f_{ck}} A_e \quad (12)$$

여기서,

$$1 \leq \alpha = \left(3 - \frac{M}{VD} \right) 1.5 \quad (13)$$

$$\beta = (0.5 + 20\rho_l) \leq 1 \quad (14)$$

이고, $A_e = 0.8A_g$ 이고 ρ_l 은 종방향 철근비이다.

원형 단면 기둥인 경우 전단철근의 공칭전단강도 및 압축력에 의한 공칭전단강도는 각각 다음 식과 같다.

$$V_{sh} = \frac{\pi}{2} \frac{A_h f_{yh} D'}{s} \cot \theta \quad (15)$$

$$V_p = P \cdot \tan \gamma \quad (16)$$

여기서, D' 는 심부 콘크리트의 지름으로 외부 후프 철근의 중심 간 거리, γ 는 기둥 중심축과 압축 스트럿이 이루는 각도를 나타낸다.

전단 보강의 범위는 콘크리트의 전단강도가 떨어지는 소성영역의 범위로서, 기둥의 바닥에서 $2D$ 범위이다.

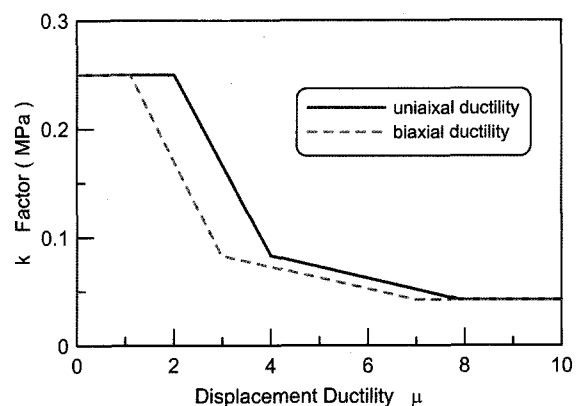


Fig. 4 Displacement ductility vs. shear strength reduction factor¹⁸⁾

원형 단면 기둥을 FRP 층으로 보강한 경우의 전단강도는 FRP 층을 $s=1$ 의 간격으로 단면적 $A_h=t_j$ 의 띠철근으로 고려하고, 큰 체적 팽창 변형, 전단 저항 메커니즘에서 주된 역할인 골재의 맞물림 효과 및 강진을 받는 경우 부재의 파손 방지를 위하여 FRP에 의한 피복시 $\epsilon_j=0.004$ 에 해당하는 응력 수준까지를 설계에 이용하였다. 따라서, 원형 단면 기둥 부재를 FRP 층으로 보강한 경우, FRP로 저항할 수 있는 전단 내력은 다음과 같이 유도된다.

$$V_{sj} = \frac{\pi}{2} t_j (0.004 E_j) D \cot \theta \quad (17)$$

여기서, θ 는 기둥의 모서리에서 상대쪽 모서리로 진전되는 사인장균열이 기둥의 축방향과 이루는 각도로서 안전측 평가를 위해 45° 로 한다.

식 (11) 및 식 (17)에 의해, 전단 보강에 필요한 FRP 층의 두께는 다음 식과 같이 산정된다.

$$t_j \geq \frac{V^0 / \phi_s - (V_c + V_{sh} + V_p)}{\frac{\pi}{2} (0.004 E_j) D \cot \theta} \quad (18)$$

4.3 변위-기반 내진 설계의 알고리즘 제시

이상에서 소개한 변위-기반 내진 설계법인 변위계수법에 의한 성능 개선된 기둥 부재의 목표 변위에 따른 FRP 층의 설계를 위한 전체 알고리즘을 Fig. 5와 같이 제시하였다.

5. FRP 보강 RC 기둥의 내진성능설계의 적용

FRP 보강 부재에 대한 변위-기반 내진성능설계 적용예를 수행하였다. 대상 구조물은 Fig. 6과 같다. 기존 철근 콘크리트 기둥에 대해 FRP 층으로 보강할 경우 설계 지진 가속도 하에서의 목표 변위 성능치에 대한 설계 두께를 결정하도록 하였다.

철근콘크리트 기둥의 높이는 5,486.4 mm, 지름은 1,829 mm, 사용된 주철근은 54#14(D43)로서 항복응력 345 MPa, 후프 철근은 #4(D12.7)로서 간격 304.8 mm에 항복응력 303 MPa이다. 콘크리트 압축강도는 41.4 MPa이며, 작용하는 축하중은 5,350 kN 이다. 설계 시 고려하고자 하는 CFRP 보강 피복 재료의 재료 특성은 파괴 강도 1,034 MPa, 탄성계수 82,800 MPa이다. 피복층은 지점부에서 기둥 단면의 지름 2D 만큼 동일 두께로 보강하였다.

설계 최대 지진 가속도 PGA 값 0.8 g에 대해서 목표로 하는 설계 변위 성능치를 155 mm로 설정하여, FRP 층의 두께 산정에 의한 내진성능설계를 수행하였다. 설계에 고려된 FEMA-356²⁰⁾의 설계 스펙트럼을 적용하여, 감쇠비 5%, 지반 조건 B인 경우에 대한 설계 가속도 스펙트럼은 Fig. 7과 같이 추정하였다.

제시된 설계 알고리즘에 기초하여, 목표 성능에 대한 CFRP 층의 보강 두께를 결정하였다. 보강되지 않은 기

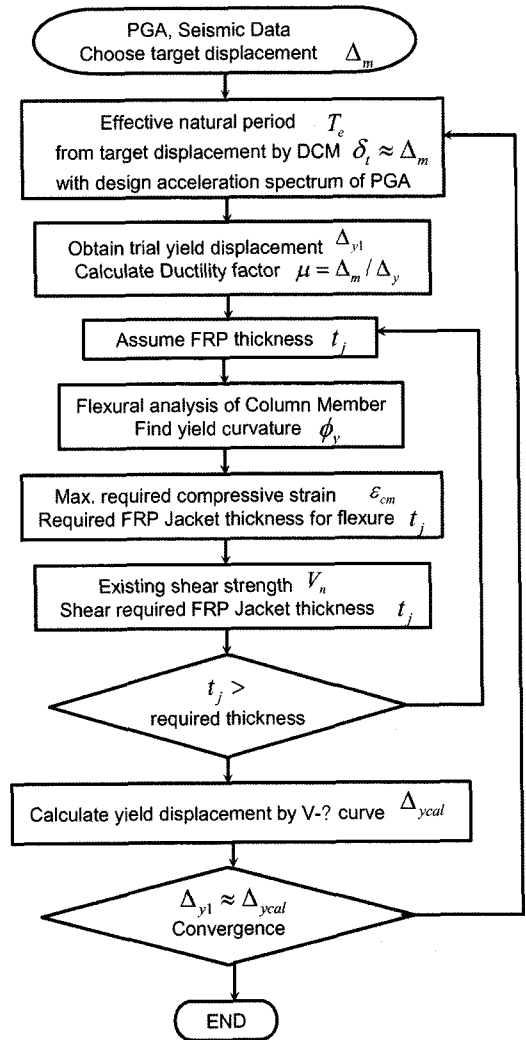


Fig. 5 Algorithm of performance-based design of FRP RC column using DCM

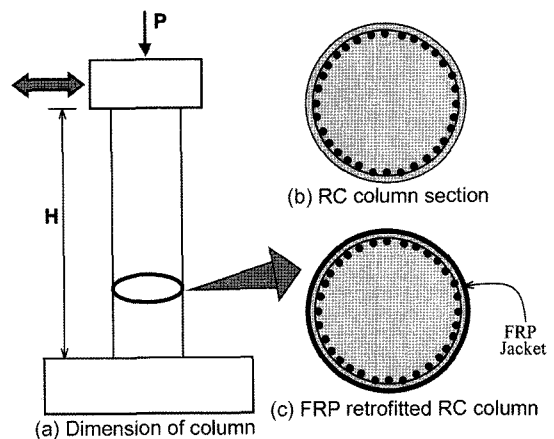


Fig. 6 Design example of retrofit RC column

존 철근콘크리트 기둥 및 최종 보강 두께 결정 후 CFRP 층으로 보강된 기둥에 대한 비선형 휨 pushover 해석 결과를 각각 Figs. 8 및 9에 나타내었다.

최종 설계 후, Table 2는 보강되지 않은 기둥에 대한 지진 성능 평가 결과 및 CFRP 피복 보강된 기둥에 대한 설계 및 성능 결과를 각각 나타낸 것이다.

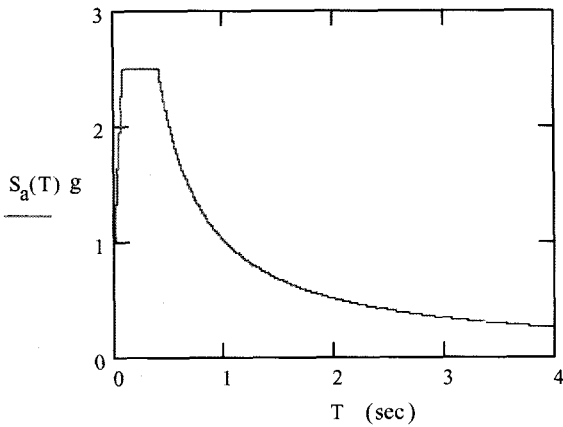


Fig. 7 Design acceleration spectrum

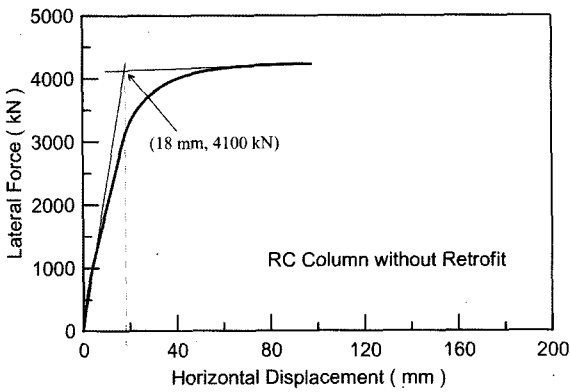


Fig. 8 Pushover curve of RC column

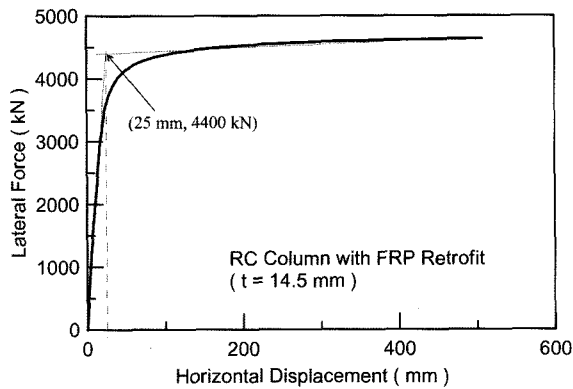


Fig. 9 Pushover curve of CFRP retrofitted RC column (14.5 mm CFRP thickness)

Table 2 Seismic performance of RC column with/without retrofit by FRP jacket

Design parameters	RC column	RC column with FRP	
		Design by DCM	Test by Priestley et al. (1996)
Design thickness of CFRP jacket	-	14.5 mm	13.8 mm
Yield displacement	18 mm	25 mm	-
Total displacement	88 mm	155 mm	190 mm
Ductility factor	4.89	6.2	-
Yield shear force	4,100 kN	4,400 kN	4,474 kN

성능 개선되지 않은 기존 철근콘크리트 기둥의 총 변위 성능치는 88 mm로 추정되었으며, 항복시 변위 및 전단력은 18 mm 및 4,100 kN으로 추정되었다.

FRP 보강한 경우, 설계 최대 지진 가속도 0.8 g에 대하여 목표 변위 155 mm를 성능치로 한 경우 CFRP 피복두께 14.5 mm의 성능설계 두께가 결정되었다. 기존 보강되지 않은 기둥에 비해서 성능 개선된 기둥 부재는 동일한 설계 지진 가속도 하에서 변위 성능 및 지진에 대한 내력 능력이 개선된 결과를 나타내고 있음을 판단할 수 있었다. 한편 Priestley¹⁸⁾ 등에 의해 실험된 동일 규모의 철근콘크리트 기둥에 대하여, CFRP 층으로 보강을 한 경우의 실험에서 13.8 mm 두께로 보강한 경우 190 mm의 변위 성능을 갖는 것으로 나타났다.

PGA 0.8 g 및 목표 성능치 155 mm로 성능 설계된 변위계수법의 설계 결과와 Priestley 등¹⁸⁾에 의한 반복 하중-변위 시험의 성능평가 결과와 직접적인 비교는 불가능하나, 보강된 CFRP 층 두께의 차이를 고려할 때 대체적으로 본 연구에서 제시한 성능설계 값은 합리적인 설계 결과로 평가된다.

6. 결 론

본 연구에서는, 최근 중진 및 강진이 발생하는 지역에서의 기존 콘크리트 구조물 내진 성능 개선을 위한 방법으로, FRP 복합재료의 보강에 의한 성능 개선 콘크리트 구조물의 내진 성능 설계 기법에 관한 변위계수법에 의한 설계 기법을 제시하였다. 성능 설계를 위한 해석모델의 개선을 위하여 다축 구성 관계를 고려한 FRP 콘크리트 부재의 비선형해석법을 적용하였다. 철근콘크리트 기둥에 대한 성능 설계의 적용 예를 통하여 대체적으로 실험에 대해 합리적인 설계 결과를 제시해 주었으며, 설계지진하중 및 목표 성능 변위에 대해서 간편하고 실용적인 설계 결과를 제공해 준다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (KRF-2005-206-D00022), 더불어 이 논문은 2007년도 두뇌한국 21 (BK21) 사업에 의해 지원되었음.

참고문헌

1. Cho, C. G. et al., "Analysis Model of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes Based on the Multi-Axial Constitutive Laws", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.131, No.9, 2005, pp.1426~1433.
2. Davol, A., Burgueno, R., and Seible, F., "Flexural Behavior of Circular Concrete Filled FRP Shells", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.127, No.7, 2001, pp.810~817.
3. Fam, A., Flisak, B., and Rizkalla, S., "Experimental and

- Analytical Investigations of Beam-Column Behavior of Concrete-Filled FRP Tubes”, *ACI Structural Journal*, Vol.100, No.4, 2003, pp.499~509.
4. Mirmiran, A. and Shahawy, M., “Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites”, *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, 1997, pp.583~590.
 5. Saadatmanesh, H. Ehsani, M. R., and Li, M. W., “Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps”, *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.4, 1994, pp.434~447.
 6. Kowalsky, M. J., Priestley, M. J. N., and MacRae, G. A., “Displacement-Based Seismic Design of RC Bridge Columns in Seismic Regions”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.24, 1995, pp.1623~1643.
 7. Calvi, G. M. and Kingsley, G. R., “Displacement-Based Seismic Design of Multi-Degree-of-Freedom Bridge Structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.24, 1995, pp.1247~1266.
 8. Freeman, S. A., “Development and Use of Capacity Spectrum Method, Paper No. 269”, *The 6th US National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Seattle, Washington, 1998.
 9. Fajfar, P., “Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.28, 1999, pp.979~993.
 10. Applied Technology Council (ATC), *Seismic Evaluation and Retrot of Concrete Building*, Report ATC-40, Redwood City, California, 1996.
 11. Chopra. A. K. and Goel, R. K., “Direct Displacement-Based Design: Use of Inelastic Design Spectra versus Elastic Design Spectra”, *Earthquake Spectra*, Vol.17, No.1, 2001, pp.47~64.
 12. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Report FEMA 273 (Guidelines) and Report 274 (Commentary), Washington, D.C., 1997.
 13. 조창근, 권민호, “3차원 구성관계를 고려한 FRP-구속 콘크리트의 압축 거동 예측 모델”, *콘크리트학회 논문집*, 16권 4호, 2004, pp.501~509.
 14. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Chai, Y.H. *Design Guidelines for Assessment Retrofit and Repair of Bridges for Seismic Performance*, Report SSRP-92/01, Univ. of California, San Diego, 1992.
 15. 조창근, “3차원 구성관계를 FRP 콘크리트 복합 구조부재 시스템의 휨 및 전단 거동예측”, *대한건축학회 논문집*, 20권 8호, 2004, pp.35~42.
 16. Cho, C. G. et al., “Flexural Model for FRP Concrete Structural Members Using Three-Dimensional Constitutive Law of Concrete”, *Engineering Structures*, 2007, in Press.
 17. Mander, J. B., Priestely, M. J. N., and Park, R., “Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete”, *J. of Structural Division*, ASCE, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804~1826.
 18. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
 19. Priestley, M.J.N. and Seible, F., *Seismic Assessment and Retrofit of Bridges*, Report SSRP-91/103, Univ. of California, San Diego, 1991.
 20. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Report FEMA 356, Washington, D.C., 2000.

요 약 본 연구에서는, FRP 피복 보강에 의한 철근콘크리트 구조물의 변위-기반 내진성능설계 기법을 제시하였다. FRP 피복 콘크리트 부재에 대한 비선형 휨 해석을 위한 정밀 예측을 위하여 콘크리트 및 FRP 복합재료의 다축 구성관계를 고려한 해석 모델을 제시하였다. FRP 피복 보강에 의한 내진성능설계를 위하여 기존 철근콘크리트 구조물에 적용하던 변위계수법에 의한 방법을 개선하여 성능 개선 부재의 FRP 보강 두께 결정을 위한 알고리즘을 제시하였다. 대상 부재의 성능 개선 설계 적용을 통하여, 본 연구에서 제시된 방법은 성능 개선 설계에 적용하는데 쉽고 용이할 뿐만 아니라 성능 개선된 부재에 대한 비선형 지진 성능 거동을 추정하는데도 실용적인 것으로 평가된다.

핵심용어 : FRP 피복, 변위계수법, 변위-기반 내진설계, 콘크리트 구조물의 내진 보강