

강판으로 보강된 원형철근콘크리트교각의 내진성능 평가에 관한 해석적 연구

이명진, 박종섭*
상명대학교 공과대학 건설시스템공학과

Numerical Study on Seismic Performance Evaluation of Circular Reinforced Concrete Piers Confined by Steel Plate

Myung-Jin Lee, Jong-Sup Park*
Department of Civil Engineering, College of Engineering, Sangmyung University

요약 본 논문은 반복하중을 받는 원형 철근콘크리트 교각 외부에 강판 보강을 적용한 경우, 교각의 성능 향상도를 정량적으로 평가하였다. 범용 유한 요소해석프로그램인 ABAQUS의 다양한 3차원 요소를 적용하여 교각 구조물을 해석하였다. 비탄성, 비선형 해석 변수로는 강판 보강 높이와 교각 높이 비, 강판 보강 두께와 교각 지름 비를 적용하였다. 교각 하부는 고정단으로 고려하였으며, 하중은 교각 상단에 횡 방향 반복하중을 가력하였다. 하중-변위 곡선, 응력-변형을 곡선, 연성도, 에너지 흡수 능력을 고려하여 보강에 따른 교각의 내진 성능 향상도를 평가하였다. 강판으로 보강한 원형철근콘크리트 교각은 보강재로 인한 외부 콘크리트 구속 효과로 인해 기둥의 항복 하중과 극한하중이 평균 3.76배 증가하였고, 에너지 흡수능력은 최대 4배 증가하였다. 소성 힌지가 발생하는 교각 하부 부분만 보강하여도 연성도가 크게 향상되었으며 강판의 두께가 두꺼울수록 에너지 흡수 능력이 가장 큰 값을 나타내었다. 본 연구결과를 토대로 원형철근콘크리트 교각의 외부 강판 보강을 통하여 교각의 구조 성능을 향상시킬 수 있음을 정량적으로 확인할 수 있었다.

Abstract This study quantitatively evaluated the performance improvement of a circular reinforced concrete pier under dynamic load with strengthening using a steel plate. Various three-dimensional elements were applied using the finite element program ABAQUS. The analytical parameters included the ratios of the steel cover length to the pier's total height and the ratios of the steel cover thickness to the pier diameter for inelastic-nonlinear analysis. The lower part of the pier had fixed boundary conditions, and lateral repetitive loads were applied at the top of the pier. The pier was investigated to evaluate the dynamic performance based on the load-displacement curve, stress-strain curve, ductility, energy absorption capability, and energy ratio. The yield and ultimate loads of piers with steel covers increased by 3.76 times, and the energy absorption capability increased by 4 times due to the confinement effects caused by the steel plate. A plastic hinge part of the column with a steel plate improved the ductility, and the thicker the steel plate was, the greater the energy absorption capacity. This study shows that the reinforced pier should be improved in terms of the seismic performance.

Keywords : Reinforced Concrete, Pier, Steel Cover, Seismic, Design

본 연구는 2020년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

*Corresponding Author : Jong-Sup Park(Sangmyung University)

email: jonpark@smu.ac.kr

Received September 7, 2020

Revised December 1, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

과거 교량의 콘크리트 교각 시공 시, 종철근은 기초면의 소성인장영역 부근에서 겹침이음에 의해 연장되었고, 횡철근은 일정한 간격으로 겹침이음 되거나 배근 양을 최적화하였다[1]. 이렇게 시공된 교각은 내진성능 평가시 콘크리트 교각의 횡구속 효과를 반영하지 않는 경우로 고려되었다. 이에 연구자와 엔지니어들은 교각의 유지보수 시 보강재로 기둥의 외부를 감싸는 외부보강을 제안하였다. 교각 외부를 둘러싸는 보강재는 기존 콘크리트에 외부 구속력을 유발하여 교각의 연성 성능을 향상시키고, 교각의 단면중대를 통해 구조물의 강도 성능을 향상시킨다.

2. 유사연구 문헌조사 및 배경 이론

2.1 철근콘크리트 교각 내진성능 실험연구

Park et al.(2005)[2]은 원형중실 철근콘크리트 교각의 횡방향 철근비를 변화시켜 내진성능에 관한 실험적 연구를 하였으며 Belal et al.(2015)[3]는 사각철근콘크리트 기둥에 외부 보강강판의 모양, 보강판의 크기, 보강판 위치와 개수를 변수로 하여 거동을 분석하였다. Han et al.(2016)[4]은 교각의 외부에 강판, 탄소섬유강화폴리머(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer), 섬유강합성판을 보강하여 각 보강재료별 효율을 검증하여 내진보강방법을 제시하였으며, Park et al.(2020)[5]은 2차원 해석을 이용하여 CFRP가 적용된 철근콘크리트 교각의 형상을 매개변수로 한 지진 취약성을 평가하고 최적의 설치길이를 제안하였다. 본 연구에서는 강판을 콘크리트 교각 외부에 보강한 경우, 강판 보강재 높이 및 두께 정도에 따라 원형철근콘크리트 교각의 내진성능 향상도를 정량적으로 분석하고자 한다. 강판보강 원형철근콘크리트교각의 내진거동을 범용 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA) 프로그램인 ABAQUS(2017)[6]를 사용하였다.

2.2 콘크리트 응력-변형률 선도

Mander et al.(1988)[7]는 콘크리트 응력-변형률의 관계를 축응력을 받는 구속 및 비구속 콘크리트 부재의 항복 전과 후의 거동을 정확히 평가하고자 Fig.1과 같은 응력-변형률 곡선을 제안하였다.

Mander의 응력-변형률 곡선은 구속 횡력은 균일하

며, 콘크리트 모델의 단조 압축 및 인장하중 조건, 주기적인 압축과 인장조건, 주기적 재하중 분기조건을 고려하였다. 곡선의 식은 Eq. (1, 2, 3, 4, 5)와 같다.

$$f_c = \frac{f'_{\alpha} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \quad (2)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{\alpha}} \quad (3)$$

$$f'_{\alpha} = f'_{co} \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - \frac{2 f'_l}{f'_{co}} - 1.254 \right) \quad (4)$$

$$\epsilon_{\alpha} = \epsilon_{co} \left(1 + 5 \left(\frac{f'_{\alpha}}{f'_{co}} - 1 \right) \right) \quad (5)$$

Where, f_c denotes a concrete stress, ϵ_c denotes concrete longitudinal compressive strain, ϵ_{α} denotes strain at peak concrete strength, E_c denotes tangent modulus of elasticity of the concrete, E_{sec} denotes secant modulus, f'_{α} denotes confined strength of concrete, f'_{co} denotes unconfined concrete strength, ϵ_{co} unconfined concrete strain, f'_l denotes constant lateral confining pressure.

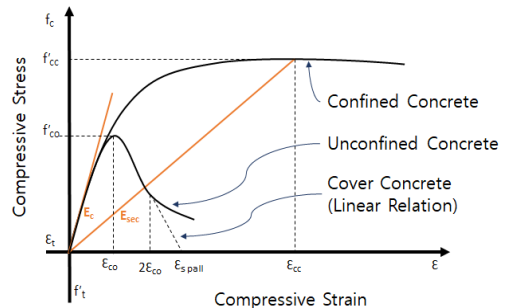


Fig. 1. Compressive Stress-Strain Curve of Confined and Unconfined Concrete(Mander et al., 1988)

일반적으로 콘크리트 인장강도는 압축강도의 30% 이내로 발생하고 있다. 본 연구에서는 압축 응력-변형률에는 Mader 모델을 적용하였고, 콘크리트 시편의 압축강도를 토대로 Wang와 Hsu(2001)[8], Kmieciak와 Kaminski(2011)[9]의 제안 모델인 Eq. (6, 7, 8)와 같이 적용하여 인장부 재료모델을 구성하고 수치해석에 적용한다.

$$f_{ctm} = 0.30f_{ck}^{(2/3)} \quad (6)$$

$$\sigma_t = E_c \varepsilon_t, \text{ if } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \quad (7)$$

$$\sigma_t = f_{cm} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t} \right)^{0.4}, \text{ if } \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \quad (8)$$

Where, f_{ctm} denotes crack stress, f_{ck} denotes specified compressive strength of concrete, σ_t denotes tension strength of concrete, ε_t denotes tension strain of concrete, ε_{cr} denotes strain at concrete cracking, f_{cm} denotes average compressive strength.

작용하는 하중이 최대에 도달 한 후 구조물에 재하된 하중이 감소하면, 구조 부재에서는 하중감소가 나타난다. 재료적으로 비탄성 상태에 도달한 강재의 경우 하중제거 시 탄성계수 기울기로 응력과 변형률 선도가 결정되지만, 콘크리트의 경우 균열이나 압쇄 등의 손상이 발생된 경우 하중제거 시 응력-변형률 선도의 보정이 필요하며 콘크리트 손상 소성도(Concrete Damaged Plasticity, CDP)를 반영한다.

2.3 연성 평가

Jeong(1994)[10]은 비탄성과 탄성의 총 에너지를 탄성과 비탄성 에너지 영역 비율에 따라 구조물의 연성도를 평가하는 방법을 제안하였다. Grace et al.(1988)[11]은 에너지 비율(비탄성에너지/전체에너지)에 따라 탄성, 비탄성 영역을 비율로 분류하였다. Fig. 2는 탄성과 비탄성 구간의 에너지를 구분하는 모습을 나타내고 있으며, Eq. (9)와 같이 계산한다.

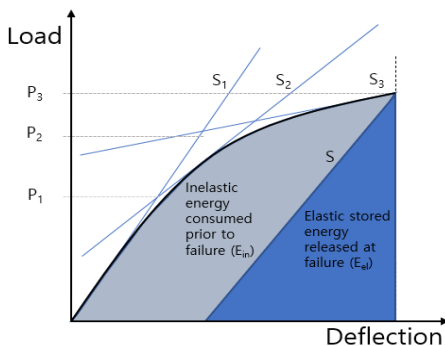


Fig. 2. Energy Index Using Load-Displacement Curve

$$S = \frac{P_1 S_1 + (P_2 - P_1) S_2 + (P_3 - P_2) S_3}{P_2} \quad (9)$$

where, S denotes slope of the line separating the elastic energy from the inelastic energy, P_1 , P_2 , P_3 denote loads, S_1 , S_2 , S_3 denotes corresponding slopes.

산정된 에너지 비율(Energy Ratio, ER)이 75%이상 인 구조물은 연성(Ductile)으로 분류하며, 70-74%인 경우 반연성(Semi-Ductile), 69%이하는 취성(Brittle)으로 분류한다.

3. 유한요소해석 모델링

3.1 해석모델의 재료 및 자원 특성

철근콘크리트 교각의 재료특성 값은 기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령·해설 및 예제집(2015)[12]을 참고하였으며, 콘크리트의 구속효과를 고려하기 위해 Mander 모델을 적용하였다. 콘크리트 밀도는 $2,000 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수 26,986 MPa, 푸아송비 0.14, 압축강도 24 MPa이며 교각의 외부 보강재인 강판은 강종 SM355로 밀도 $7,850 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수 210 GPa, 항복 응력 및 극한응력은 355 MPa, 490 MPa를 적용하였다. 콘크리트를 CDP요소로 적용하고자 팽창각도(Dilation angle)는 36, 편심도(Eccentricity)은 0.1, 이축 압축강도와 일축압축강도 비(f_{bo}/f_{co})는 1.16, 순수 축응력과 압축/인장을 받는 편차 단면의 거리의 비(k)는 0.667, 감쇠도(Viscosity parameter)는 0을 적용하였다.

예제집[12]의 대표 교각 모델을 적용하여 자원은 높이 5.25 m, 직경 1 m, 횡철근은 200 mm마다 배근하였고, 주철근은 1단으로 단면에 53개 배근하였다. Fig. 3과 같이 강재 외부 보강 정도에 따른 거동특성 분석을 위하여 강판의 보강높이와 강재 보강두께를 해석변수로 적용하였다. 보강 길이와 교각 전체 높이비(LH)는 0, 25, 50, 75, 100 %로 적용하였으며, 보강재 두께와 교각지름 비(TD)는 보강높이비(LH) 100 %를 기준으로 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 %까지 증가시켜 검토하였다. LH 모델의 경우 강판의 두께는 4 mm로 일정한 값으로 적용하였다.

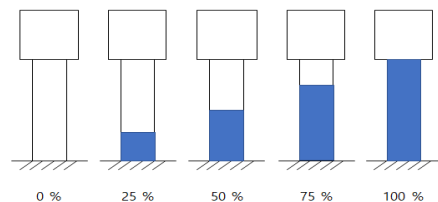


Fig. 3. Ratio of Steel Cover Length to Pier Height (LH)

3.2 해석모델의 경계조건 및 하중재하

Fig. 4는 해석모델의 매쉬(Mesh), 적용 요소(Element) 종류 및 경계조건과 하중을 나타내고 있다. 교각 상부 (Pier or Loading Cap)와 콘크리트는 C3D8R의 솔리드(Solid)요소를 적용하고 철근은 트러스요소, 보강 강판은 S4R의 셸요소를 적용하였다. 콘크리트 내부에 배근된 철근은 ERO(Embedded Region Option)를 적용하였으며 강판과 콘크리트는 Tie Option을 적용하여 강재와 콘크리트가 일체거동 하도록 하였다[13].

적용된 요소 수를 살펴보면, 교각 상부는 360개, 콘크리트 교각은 1998개, 중철근 10개, 횡철근 22개, 강판 보강재는 25 %의 높이비 기준 198개의 요소 수를 적용하였다. 교각은 자중을 고려하였으며, 교각상부의 중앙부분에 Fig. 5과 같은 주기하중(cyclic loading)을 가하였다. Fig. 5의 주기하중은 실제 교각 작용사례를 토대로 초당 3회 반복가력하였다. 가력하중의 크기는 횡하중을 받은 후 변위와 횡하중을 받기 전의 변위 비를 1에서 5까지 변화를 주며 가력하였다.

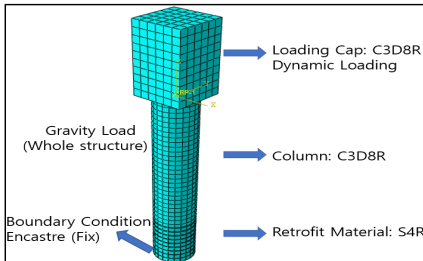


Fig. 4. Boundary and Loading Conditions of Meshed Numerical Model

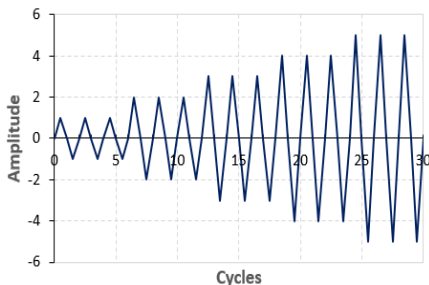


Fig. 5. Lateral Dynamic Loading

3.3 해석모델링 적절성 검토

Choi et al.(2009)[14]는 콘크리트 공시체에 강재보강 방법(강재 분리형과 일체형, 강재 단층 및 복층), 강재 두께, 공시체와 강재 사이의 접착제 등의 실험결과를 토

대로 구성모델(constitutive model)를 제안하였다. Choi et al.(2009)[14]의 콘크리트 공시체의 실험결과와 본 연구의 유한요소해석결과를 비교하여 모델링의 적절성을 검토하였다. Fig. 6은 공시체에 발생하는 수직응력과 변형률을 나타내고 있다. 실험결과와 해석결과는 비보강 공시체의 경우 최대 2.56 %, 평균 1.17 %, 보강 공시체의 경우 최대 6 %, 평균 2.64 %의 차이를 보였다. 비교분석을 통해 해석에 적용한 요소, 요소 갯수, 하중 및 경계조건 등의 적용이 합리적인 것으로 판단하였다.

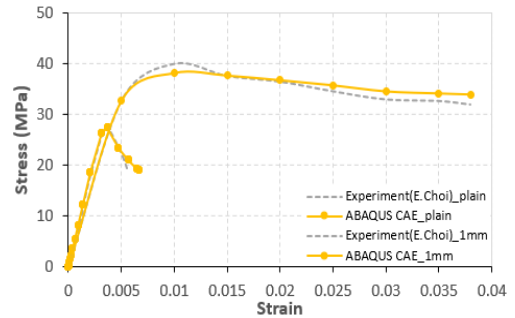


Fig. 6. Comparison of Choi et al.[14] and FEA Result

4. 유한요소해석 결과

강재 보강에 따른 교각의 내진성능을 평가하기 위해 구조물의 압축응력 변형률 이력곡선, 하중-변위 이력 및 골격 곡선(skeleton curve), 연성도 및 손상지수를 분석하였다. 반복 횡하중에 대해 교각의 하단에서 가장 큰 응력이 발생하였다.

4.1 변수별 응력-변형률 곡선

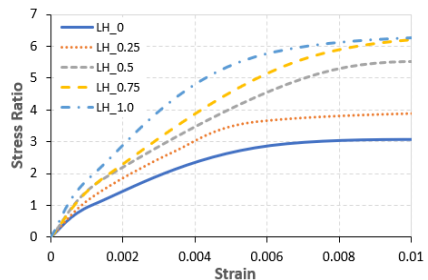


Fig. 7. Stress-Strain Curves According to LH Ratios

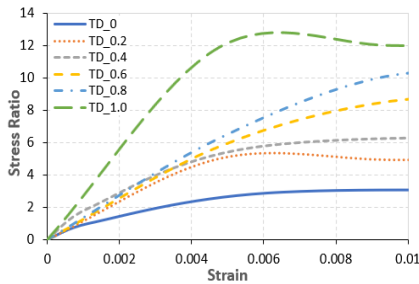


Fig. 8. Stress-Strain Curves According to TD Ratios

Fig. 7과 Fig. 8은 보강에 따른 응력-변형률 선도의 모습을 나타내고 있다. 비보강 교각의 경우 극한응력은 261 kPa이었으며 TD 0.2인 경우 극한응력은 439 kPa, TD 1.0인 경우 극한응력은 923 kPa로 증가하였다. 최대 응력 도달 후 응력과 변형률 곡선의 변화를 살펴보면 보강에 따른 강성도 및 에너지 증가를 확인할 수 있다.

4.2 하중-변위 이력곡선

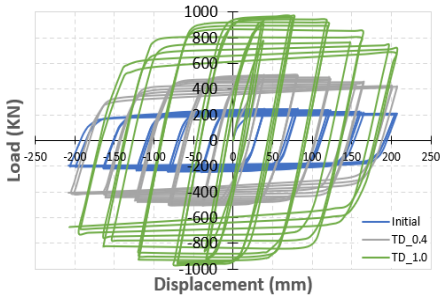


Fig. 9. Load-Displacement Hysteresis Curve with and without Steel Plate

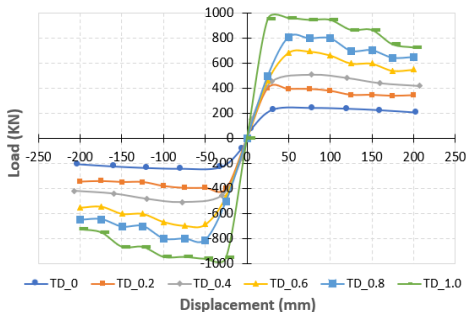


Fig. 10. Load-Displacement Skeleton Curve of TD Ratios

Fig. 9와 Fig. 10은 TD 해석변수별 교각의 하중-변위 이력곡선과 골격곡선을 나타내고 있다. 해석변수 LH비

율 증가에 따라 비보강 항복하중(LH0, 180.75kN)을 기준으로 31 %, 76 %, 112 %, 112 % 향상하였고, TD비율 증가에 따라 66 %, 110 %, 188 %, 236 %, 298 % 향상하였다. 교각 외부에 보강하는 강판의 보강비가 증가함에 따라 교각의 하중-변위 곡선은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Table 1과 2는 TD와 LH 해석변수에 따른 항복하중과 변위, 극한하중과 변위를 비교하여 나타내었다. 여기서 항복변위는 최대하중의 75 %의 지점을 항복하중으로 결정하고 원점과 항복하중의 하중-변위 곡선 점을 직선으로 연장하여 최대하중의 수평선과 만나는 점의 변위로 정의하였다. 극한변위는 하중-변위 곡선에서 하중의 끝점에 해당하는 수평축 값으로 결정하였다[15].

Table 1과 2에 나타난 바와 같이 LH1.0에서 항복응력은 비보강 교각에 비해 2.11배, 극한하중은 2.04배 증가하였으며, TD1.0에서 항복응력은 비보강 교각에 비해 3.98배, 극한하중은 3.54배 증가하였다.

Table 1. Comparisons of Load and Displacement According to LH Ratios

Case	Ratio	Load		Displacement	
		Yield	Ultimate	Yield	Ultimate
Initial	0	1.0	1.0	1.0	1.0
LH	0.25	1.31	1.33	1.0	0.97
	0.5	1.76	1.79	1.52	0.89
	0.75	2.11	2.04	1.24	1.01
	1.0	2.11	2.04	1.51	1.02

Table 2. Comparisons of Load and Displacement According to TD Ratios

Case	Ratio	Load		Displacement	
		Yield	Ultimate	Yield	Ultimate
Initial	0	1.0	1.0	1.0	1.0
TD	0.2	1.66	1.68	1.24	0.98
	0.4	2.11	2.04	1.51	1.01
	0.6	2.88	2.68	1.52	0.99
	0.8	3.36	3.17	1.56	0.99
	1.0	3.98	3.54	1.00	0.99

4.3 에너지 흡수 능력 및 에너지 비율

하중-변위 곡선의 각 사이클의 면적은 에너지 흡수능력(Energy Absorbtion Capacity, EAC)으로 콘크리트 교각 손상평가 시 부재가 파괴시까지 에너지를 흡수할 수 있는 능력으로 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중 하나이다[16]. Fig. 11은 LH, TD 해석변수별 에너지

흡수능력을 나타내고 있다. LH 증가에 따른 에너지 흡수 능력은 LH1.0은 비보강 교각보다 2배의 에너지 흡수 능력을 보였으며, TD의 경우 TD0.2에서 TD0.4, TD0.6에서 TD1.0(154 kN·m)에서 에너지 흡수능력이 직선적으로 증대되는 것을 알 수 있다.

Table 3과 Table 4는 응력-변형률 곡선에 따른 에너지 비(ER, Fig.2의 비탄성에너지/전체에너지 비)를 나타내고 있다. 비보강 교각의 경우 ER이 84 %이고, LH 보강의 경우의 ER은 93 %이상, TD 보강의 경우 87 %이상으로 향상되었다. 본 연구에 적용된 교각은 강판 외부 보강 전에도 연성부재이다.

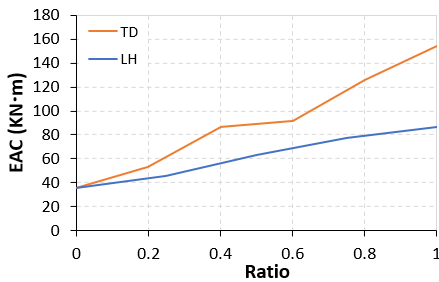


Fig. 11. EAC According to LH and TD Ratios

Table 3. Comparison of Stress, Strain, ER with LH

Case	Stress Ratio	Strain	ER(%)	Class	
Initial	0	1.00	0.037	84	Ductile
LH	0.25	1.32	0.037	98	Ductile
	0.5	1.78	0.033	93	Ductile
	0.75	2.04	0.039	97	Ductile
	1.0	2.04	0.039	99	Ductile

Table 4. Comparison of Stress, Strain, ER with TD

Case	Stress Ratio	Strain	ER(%)	Class	
Initial	0	1.00	0.037	84	Ductile
TD	0.2	1.48	0.038	87	Ductile
	0.4	1.83	0.039	99	Ductile
	0.6	2.21	0.038	93	Ductile
	0.8	2.58	0.038	94	Ductile
	1.0	2.91	0.038	90	Ductile

5. 결론

본 연구에서 강판으로 보강된 원형철근콘크리트 교각의 최적화된 보강효과 및 구조물의 정량적인 성능을 평가하였다. 강판보강높이와 교각전체높이 비(LH), 강판보강두께와 교각직경 비(TD)를 해석변수로 하여, 하중, 변

위, 응력, 변형률, 에너지 흡수능력, 에너지비율 등을 고려하여 교각의 성능향상을 비교하여 다음의 결론을 도출하였다.

- 1) 해석변수 LH에 따른 결과비교를 통하여 항복하중 (LH0, 180.75kN)을 기준으로 31 %, 76 %, 112 %, 112 % 향상 되었고, 극한하중을 기준으로도 유사한 강도증가를 확인할 수 있었다. 항복변형률의 경우 LH증가에 따라 큰 값을 보이고 있으나 극한 변형률의 경우 유사한 값을 보이고 있다. 에너지 흡수능력은 LH1.0의 경우 2배로 증가하였으며, 에너지 비율 또한 LH1.0의 경우 99 %를 보이고 있다.
- 2) 해석변수 TD에 따른 결과비교를 통하여 강판의 두께증가에 따라 구조물의 성능이 크게 향상되는 것을 알 수 있었다. TD1.0인 경우 항복하중과 극한하중이 각각 3.98배, 3.54배 증가하였다. 보강 후 에너지 흡수능력은 두께비가 증가할수록 향상되었으며, 에너지 비율은 87 %~99 %의 값을 나타내었다.
- 3) 해석변수 LH비의 경우 LH0.25에서 에너지비가 98 %로 교각의 하부 25 %만 보강하여도 높은 에너지비를 보였다. 지진시 소성힌지가 발생하는 교각하부 부분만 보강하여도 연성도가 매우 크게 향상되는 것을 본 해석연구를 통해 확인할 수 있었다. 해석변수 TD의 경우 TD0.4에서 가장 큰 에너지 비를 나타내었다.
- 4) 본 연구에서는 보강재의 높이, 두께를 증가시킬수록 재하하중 및 응력, 연성능력이 향상되는 것을 정량적으로 확인하였다. 해석변수 LH와 TD를 비교해 보면, TD1.0에서 에너지흡수능력이 가장 큰 값을 보였으며 강판의 두께를 증가시키는 경우에 보다 큰 보강효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

향후 보강재와 교각의 부착정도에 따른 내진성능향상을 평가하는 후속연구가 진행될 것이다.

References

- [1] J. K. Kim, I. H. Kim, H. W. Lim, J. H. Lee, "Seismic Upgrading of Existing Circular RC Pier with Steel Jacket", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 5A, pp. 911-920, 2003.
- [2] S. J. Park, T. H. Kim, Y. J. Kim, H. T. Kang, "An Experimental Study on Seismic Performance of

- Circular Reinforced Concrete Bridge Columns with Confinement Steel”, *KSCCE 2015 Convention Conference & Civil Expo*, Korean Society of Civil Engineers, Korea, PP. 1847-1850, Oct. 2005.
- [3] M. F. Belal, H. M. Mohamed, S. A. Morad, “Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket”, *HBEC Journal*, Vol. 11, No. 2, PP. 201-212, May. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrci.2014.05.002>
- [4] K. B. Han, D. Y. Cho, J. S. Kim, “Seismic performance evaluation and improvement for damaged reinforcement concrete piers using a fiber steel composite plate”, *Journal of Vibroengineering*, Vol. 18, No. 7, pp. 4574-4582, Nov. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17422>
- [5] T. Y. Park, S. Y. Lee, G. S. An, “Reinforcement Effect of CFRP Jacket of Non-seismic Details Reinforced Concrete Piers Based on the Earthquake Fragility Curve”, *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 11, No. 3, PP. 8-15, Jun. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.11004/kosacs.2020.11.3.08>
- [6] Dassault Systems, ABAQUS/CAE 2016: Analysis user’s guide, Dassault Systemes Simulia Corporation: Johnston, RI, USA, 2016.
- [7] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, “Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, NO. 8, pp. 1804-1826, Sep. 1988.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [8] T. Wang, T. T. C. Hsu, “Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models”, *Computers and Structures*, Vol. 79, Issue. 32, PP. 2781-2791, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00157-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00157-2)
- [9] P. Kmieciak, M. Kaminski, “Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 3, PP. 623-636, 2011.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60105-8](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60105-8)
- [10] S. M. Jeong, *Evaluation of ductility in prestressed concrete beams using fiber reinforced plastic tendons*, Ph.D dissertation, University of Michigan, 1994.
- [11] N. F. Grace, A. K. Soliman, G. Able-Sayed, K. R. Saleh, “Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 2, No. 4, pp. 186-194, Nov. 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(186\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(186))
- [12] Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation(KISTEC), *Guidelines, explanations, and examples of seismic performance evaluation of existing facilities (bridge)*, 2015.
- [13] D. H. Won, T. H. Han, S. G. Kim, Y. J. Kang, “Internal Confining Stress of Internally Confined Hollow Columns under Compressive Load”, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 25, No. 3, PP. 243-254, Jun. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kioss.2013.25.3.243>
- [14] E. Choi, J. Park, T. H. Nam, S. J. Yoon, “A new steel jacketing method for RC columns”, *Magazine of concrete Research*, Vol. 61, No. 10, PP. 787-796, Dec. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1680/macrc.2008.61.10.787>
- [15] D. H. Lee, J. H. Lee, Y. S. Chung, J. Y. Park, “Quasi-Static Test for Seismic Performance of R/C Bridge Piers Retrofitted with Glassfibers”, *KCI Spring 2001 Convention*, Korea Concrete Institute, Korea, Vol. 13, No. 1, pp. 871-876, May. 2001.
- [16] D. H. Lee, Y. S. Chung, J. H. Lee, H. J. Song, “Seismic Performance Evaluation of RC Bridge Piers with Lap Splice of Longitudinal Steel in the Aspect Ratio of 4.0”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 5A, PP. 1193-1202, Sep. 2002.

이 명 진(Myung-Jin Lee)

[준회원]



- 2019년 8월 : 상명대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 일반대학원 건설시스템공학과 석사과정

<관심분야>

구조공학, 유한요소해석, 교량공학, 내화구조

박 종 섭(Jong-Sup Park)

[종신회원]



- 1994년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2002년 12월 : Auburn University (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 교량공학, 좌굴, 유지보수, 지중구조, 내화