

기계학습기반 기동 파괴유형 분류모델을 활용한 학교건축물의 내진보강전략 구축

Machine Learning-Based Retrofit Scheme Development for Seismically Vulnerable Reinforced Concrete School Buildings

김수빈¹⁾ · 최인섭²⁾ · 신지욱^{3)*}

Kim, Subin¹⁾ · Choi, Insub²⁾ · Shin, Jiuk^{3)*}

¹⁾경상국립대학교 건축공학과 박사과정, ²⁾계명대학교 건축공학과 조교수, ³⁾경상국립대학교 건축공학과 부교수(공학박사)

¹⁾Ph. D. Student, Department of Architecture Engineering, Gyeongsang National University, ²⁾Assistant Professor(PhD), Department of Architectural Engineering, Keimyung University, ³⁾Associate Professor(PhD), Department of Architecture Engineering, Gyeongsang National University

/ A B S T R A C T /

Many school buildings are vulnerable to earthquakes because they were built before mandatory seismic design was applied. This study uses machine learning to develop an algorithm that rapidly constructs an optimal reinforcement scheme with simple information for non-ductile reinforced concrete school buildings built according to standard design drawings in the 1980s. We utilize a decision tree (DT) model that can conservatively predict the failure type of reinforced concrete columns through machine learning that rapidly determines the failure type of reinforced concrete columns with simple information, and through this, a methodology is developed to construct an optimal reinforcement scheme for the confinement ratio (CR) for ductility enhancement and the stiffness ratio (SR) for stiffness enhancement. By examining the failure types of columns according to changes in confinement ratio and stiffness ratio, we propose a retrofit scheme for school buildings with masonry walls and present the maximum applicable stiffness ratio and the allowable range of stiffness ratio increase for the minimum and maximum values of confinement ratio. This retrofit scheme construction methodology allows for faster construction than existing analysis methods.

Key words: Seismically-vulnerable RC school buildings, Machine-learning, Retrofit scheme

1. 서론

국내에서는 1988년에 처음으로 내진 규정이 제정되었기 때문에, 그 이전에 지어진 건축물들은 부족한 내진설계와 노후화로 인하여 지진 발생 시 큰 피해가 발생할 것으로 판단된다. 국내 많은 학교 건축물들이 1980년대에 건축되었으며, 이들 중 상당수는 내진 설계 기준에 부합하지 않아 지진 발생 시 심각한 피해가 예상된다. 특히, 5층 이하의 학교 건축물의 경우, 2005년 내진 설계 의무 적용 이전에 건축된 경우가 대다수(95.5%)이며, 이는 해당 건축물들이 지진에 취약하다는 것을 의미한다[1]. 이탈리아에서는 남부 이탈리아의 2002년 Molise 지진 이후, 기존 학교 건축물의 지진 취약성에 대한 관심이 크게 증가하였다[2]. 이 지진으로 인해 San Giuliano에 위치한 초등학교가 붕괴되어 27명의 학생과 한 명의 교사가 사망하였다. 또한 2008년에 발생한 Wenchuan 지진으로 인해 초등학교와 중학교 건물 중 상당수는 심각한 피해나 붕괴가 발생하였으며 많은 학생이 희생되었다.

학교 건축물은 교육의 변화와 질적 향상에 신속하게 대응하기 위하여 증축이나 용도변경이 수반되는 경우가 많다. 증축 및 용도변경으로 인하여 축력이 증가하므로 이는 건축물의 구조적 안전성에 영향을 줄 수 있다. 축력은 기둥의 최대강도, 에너지 흡수능력, 그리고 최대변위에 상당한 영향을 미친다. 이는 축력이 구조물의 충격 저항력에 중요한 역할을 보여준다[3]. 또한, 용도변경은 기존 건축물과 다른 안전기준과 하중요구사항을 필요로 한다. 이러한 변화가 발생하면 기존 구조적 요소의 적합성과 추가 보강이 필요하지 판단하여야 한다.

학교 건축물은 교육의 변화와 질적 향상에 신속하게 대응하기 위하여 증축이나 용도변경이 수반되는 경우가 많다. 증축 및 용도변경으로 인하여 축력이 증가하므로 이는 건축물의 구조적 안전성에 영향을 줄 수 있다. 축력은 기둥의 최대강도, 에너지 흡수능력, 그리고 최대변위에 상당한 영향을 미친다. 이는 축력이 구조물의 충격 저항력에 중요한 역할을 보여준다[3]. 또한, 용도변경은 기존 건축물과 다른 안전기준과 하중요구사항을 필요로 한다. 이러한 변화가 발생하면 기존 구조적 요소의 적합성과 추가 보강이 필요하지 판단하여야 한다.

1980년대 건축물의 주된 문제점 중 하나는 비내진 상세(직경이 작은 띠철근의 배근, 띠철근의 넓은 간격 배치, 90도 띠철근 등)가 적용된 것이다[4]. 이러한 비내진 상세를 가진 철근콘크리트 건축물은 기둥의 파괴유형이 전체 거동에 영향을 미칠 수 있다. 비내진 상세로 인해 전단파괴가 발생할 경우

*Corresponding author: Sih, Jiuk

E-mail: jiukshin@gnu.ac.kr

(Received May 8, 2024; Revised July 19, 2024; Accepted July 22, 2024)

우, 기둥의 연성능력이 낮아 지진이 발생하는 동안 에너지를 흡수하고 분산시키는 능력이 부족하여 즉각 붕괴되거나 과도한 연층현상이 발생할 수 있다. 보-기둥 접합부의 강도와 연성이 부족하여[5] 지진 발생 시 기둥, 보 등 주요 구조 부재에 취약점이 나타날 수 있으며 이는 충분한 연성을 제공하지 못하여 결과적으로 구조적 손상이나 붕괴로 이어질 수 있다. 따라서 지진에 취약한 구조 상세를 가지는 기둥에 대한 보강전략 수립이 필요하다.

외부 철근이나 강판을 사용하여 기둥을 감싸 강도를 높이는 방법과 섬유 강화폴리머(Fiber-Reinforced polymer, FRP) 재킷이나 시트를 사용하여 기둥의 연성을 증가시키는 방법이 있다[6]. 해당 보강 방법론은 지진으로 인한 변형에 대하여 저항능력을 향상시켜 기둥의 손상을 완화할 수 있으며, 지진에너지의 효율적 소산 능력(균등한 손상 분배)을 부여하여 전체 건축물의 구조적 안전성을 향상시킬 수 있다. Shin et al.[7]에 따르면, 광판 전단벽 보강은 강도증진과 변위 저감에 효과적이다. Wang et al.[8]은 지진으로 인해 손상된 철근콘크리트 골조를 CFRP(Carbon Fiber-Reinforced Polymer) 시트로 보강하는 방법에 대하여 연구하였다. CFRP로 보강된 철근콘크리트 골조는 우수한 연성을 보였으며, 초기강성 및 에너지 소산능력이 크게 향상됨을 보여준다.

본 연구는 구조물의 내진 보강방법으로서 구속비(Confinement Ratio, CR)와 강성비(Stiffness Ratio, SR)를 중점적으로 다룬다. 구속비는 기둥의 내진 성능 향상을 위한 중요한 지표 중 하나이며, 구조물에 적용된 FRP 재킷과 같은 보강재를 통해 콘크리트 기둥에 가해지는 구속압의 효과를 나타낸다. FRP 재킷은 콘크리트 기둥에 설치하여 축하중에 대한 부피 팽창을 제한함으로써 기둥의 연성과 강도를 향상시키는 것으로 알려져 있다. Shin et al.[9]은 FRP 재킷 시스템을 활용하여 비연성 철근콘크리트 골조의 내진 응답에 대한 연구를 수행하여 FRP 재킷 시스템의 보강효과를 보여준다. 실험 결과에 따르면, FRP 재킷 시스템이 내진 보강이 필요한 구조물의 성능(하중 분산, 연성능력 등)을 향상시키는 데 효과적임을 보여주며 특히, 연층현상을 상쇄하여 균일한 층간변위분포를 형성함을 보여준다. 여러 실험 및 해석 연구를 통해 FRP 재킷의 적용이 기둥의 내진성능을 크게 향상시킨다는 결과가 보고되었으며, 이러한 방법은 이미 다수의 내진 보강 사례에서 실용화되고 있다. 강성비는 기둥 또는 벽체의 초기 강성 대비 보강 후 강성의 비율로 정의된다. 이는 기둥 단면의 확장, 전단벽의 증설 또는 가새의 설치와 같은 구조적 보강 방안이 구조물의 강성에 미치는 영향을 평가하는 데 사용된다. 이러한 보강 방법은 지진과 같은 동적 하중에 대한 건축물의 반응을 개선하는데 사용되며, 구조물의 내진 성능을 효과적으로 향상시키는 것으로 입증되었다[10]. 강성비의 증가는 건축물의 기본 진동 주파수를 변화시켜 일부 지진파의 공진을 피할 수 있게 하지만, 단주기 지진파와의 공진을 유발할 가능성도 있으므로 주파수 특성을 종합적으로 고려한 설계가 필요하다. Ozkul et al.[11]은 철근콘크리트 골조에 대한 전단벽의 내진 성능 영향을 분석하였으며, 특히 2011년 터키 지진으로 인해 손상된 두 건물을 사례로 전단벽이 있는 건축물이 더 우수한 내진 성능을 보임을 확인하였다. 전단벽은 철근콘크리트 건축물의 내진 성능에 중요한 영향을 미치며, 전단벽의 증설이 건축물의 전체적인 안전성을 향상시키는 데 기여한다.

본 연구는 기계학습 방법론을 통하여 과거에 개발된 파괴유형 분류모델을 활용한 보강전략 도출 방법론을 제시하였다. 2005년 이전에 지어진 대다수의 학교 건축물은 당시 문교부에서 제공한 표준설계도에 기반하여 시공되었다. 이 중에서도 1980년대 표준설계도에 따라 건설된 건축물들은 내진 설

계 기준이 반영되지 않아 현재 내진 성능이 부족한 것으로 평가되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 1980년대 표준설계도를 준용하여 건설된 학교 건축물을 연구 대상으로 선정하였다. 대상 건축물인 3층 비내진 철근콘크리트 학교 건축물을 위한 보강전략을 기계학습을 활용하여 파괴유형을 판단하는 모델을 통해 기둥의 강성증가 및 연성증가와 관련된 구속비와 강성비를 활용하여 보강전략을 구축한다.

2. 기계학습방법론

2.1 입력변수 및 출력변수

본 연구는 ACI(American Concrete Institute)와 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center) 보고서[12]를 기반으로 한 과거 실험 데이터를 활용하여 기계학습 모델을 통해 철근콘크리트 기둥의 파괴유형을 예측한다. 데이터베이스는 총 330개의 직사각형 철근콘크리트 기둥에 관한 다양한 정보와 함께 여러 파괴유형을 포함한다. 철근콘크리트 기둥의 파괴유형을 예측하는 모델의 개발을 위해 철근콘크리트 기둥의 파괴유형을 출력변수로 선정한다. 파괴유형은 휨파괴유형, 휨-전단파괴유형 그리고 전단 파괴유형으로 구성되며 Fig. 1은 철근콘크리트 기둥 데이터베이스의 세부 구성을 보여준다. 특히, 휨파괴유형이 전체 철근콘크리트 기둥 데이터 중 72.4%로 가장 높은 비중을 차지한다. 과거 연구에서 철근콘크리트 기둥의 파괴유형을 전단 요구 곡선과 전단 성능 곡선 간의 교차관계에 따라 세 가지로 정의한다[13]. Table 1은 세 가지 파괴유형에 대한 정의를 보여준다. Fig. 2와 같이 전단 성능 곡선과 전단 요구 곡선의 교차점이 발생하지 않으면 해당 부재는 휨파괴로 판단하고, 교차점이 발생하면 해당 부재는 전단파괴로 판

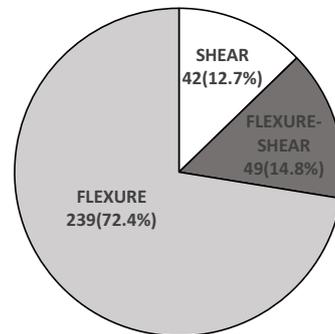


Fig. 1. Reinforced concrete column database for failure mode classification

Table 1. The considered failure mode

Failure Mode	Description
Flexure	Degradation occurred due to flexural deformation after yielding of the longitudinal reinforcement
Shear	Degradation (diagonal cracks) occurred due to shear distress before yielding of the longitudinal reinforcement
Flexure-shear	Degradation occurred after yielding of the longitudinal reinforcement but results from shear distress

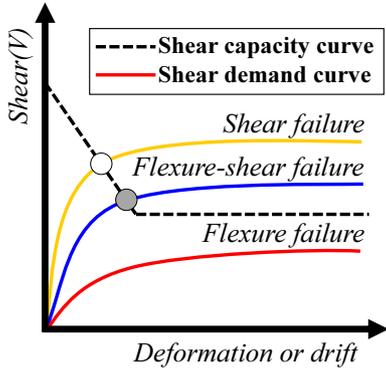


Fig. 2. Determination of failure mode of RC column

단한다. 또한, 교차점이 주철근의 항복 이전에 발생하면 전단파괴, 이후에 생기면 휨-전단파괴로 분류한다. 본 연구에서는 전단 성능 곡선과 전단 요구 곡선의 교차점을 기반으로 휨-전단파괴유형을 전단파괴유형에 포함하여 최종적으로 두 가지 파괴유형으로 예측하는 모델을 개발한다.

입력변수는 과거 연구를 기반으로 콘크리트 압축강도(f_c), 축력비($P/A_g f_c$), 형상비(L/D), 주철근비(ρ_l) 그리고 전단철근비(ρ_t)로 설정한다. 다양한 강도 조건에서 파괴유형을 예측하기 위해 콘크리트 압축강도를 입력변수로 설정한다. 축방향 하중의 영향에 대한 연구에 따르면, 철근콘크리트 기둥에 가해지는 축력비가 증가할수록 연성이 감소하는 것으로 나타났다[14-16]. Priestley and Park[17]는 낮은 축력과 높은 축력을 받는 기둥의 하중-변위 이력곡선을 보여주고 일반적으로 축력이 낮은 경우에 축력이 높을 때보다 연성거동이 향상됨을 보여준다. Bažant and Kwon[18]은 기둥의 형상비가 증가함에 따라 크기효과(size effect)와 취성도가 증가함을 보여준다. 형상비가 증가하면 압축력에 의해 좌굴이 발생하기 쉽고, 이는 연성을 감소시킨다. 장주기둥의 경우 형상비가 크기 때문에 좌굴에 취약해지고, 이는 기둥의 전체적인 연성을 감소시킨다. 동시에 기둥의 강성이 낮아져 휨파괴가 발생하기 쉬운 구조적 조건을 만들기 때문에 휨파괴가 주요 파괴 모드로 발생할 수 있다. 따라서 형상비는 기둥의 파괴유형에 영향을 미치는 주요 변수이다 [19]. Shi et al.[20]은 전단철근비가 증가함에 따라 강도가 증가하고 에너지

소산능력이 향상됨을 보여준다. Mo and Wang[21]에 따르면 전단철근의 간격이 감소할수록 연성능력이 증가하고 휨파괴가 발생하며, 전단철근의 간격이 큰 경우 기둥은 전단파괴에 취약하다[22]. Shi et al.[20]은 주철근비가 증가함에 따라 휨강도는 증가하지만 변위에는 거의 차이가 없음을 보여준다. Grgić et al.[23]의 연구에 따르면 주철근 단면적이 증가할수록 기둥의 최대 변위가 감소하고, 주철근 단면적이 넓은 기둥보다 주철근 단면적이 좁은 기둥이 더 큰 연성을 가진다고 보고되었다. Karaton and Awla[24]은 변위기반의 fiber 요소 방법을 사용하여 철근콘크리트 골조의 비선형 정적 pushover 분석을 수행하여 주철근비가 증가할수록 강성 및 최대 강도가 증가함을 보여준다.

2.2 철근콘크리트 기동 파괴유형 예측모델 결정

본 연구에서는 Kim et al.[25]이 개발한 기계학습 모델을 철근콘크리트 기동 파괴유형 예측모델로 선정하였다. Fig. 3은 간단한 입력정보를 기반으로 한 4가지 기계학습 모델의 성능을 오차행렬을 통해 판단하는 데이터 기반 예측 분석 과정을 보여준다. Kim et al.[25]은 철근콘크리트 기동 파괴유형 예측모델을 개발하기 위해 4가지 기계학습의 성능을 분류모델성능평가지표를 이용하여 평가하고 평가 결과를 바탕으로 가장 정확하고 신뢰성 있는 모델을 최종모델로 선정하였다. 분류모델성능평가지표는 오차행렬을 통하여 확인할 수 있으며, 오차행렬의 결과를 기반으로 정밀도, 재현율, F1-Score, 그리고 AUC(Area Under the Curve)를 산정할 수 있다. 정밀도(precision)는 휨파괴라고 예측한 것 중 실제 휨파괴인 비율이고, 재현율(recall)은 실제 휨파괴 중 휨파괴라고 예측한 비율이며 F1-score은 재현율과 정밀도의 조화평균이다. AUC는 ROC(Receiver Operating Characteristic) Curve 의 아래 면적을 말하며 1에 가까울수록 모델의 성능이 더 우수하다고 판단한다. 기계학습 방법론의 모든 방법이 휨파괴유형을 정확하게 예측하는 데 효과적임을 보여준다. 파괴유형별 분류모델성능평가지표에서 정밀도, 재현율, F1-Score, 그리고 AUC의 평균값을 고려하였을 때, 랜덤포레스트(Random Forest, RF)와 의사결정나무(Decision Tree, DT)모델이 전반적으로 우수한 성능(다른 방법론 대비 최대 16.5%)을 보여주었다. 특히, 의사결정나무

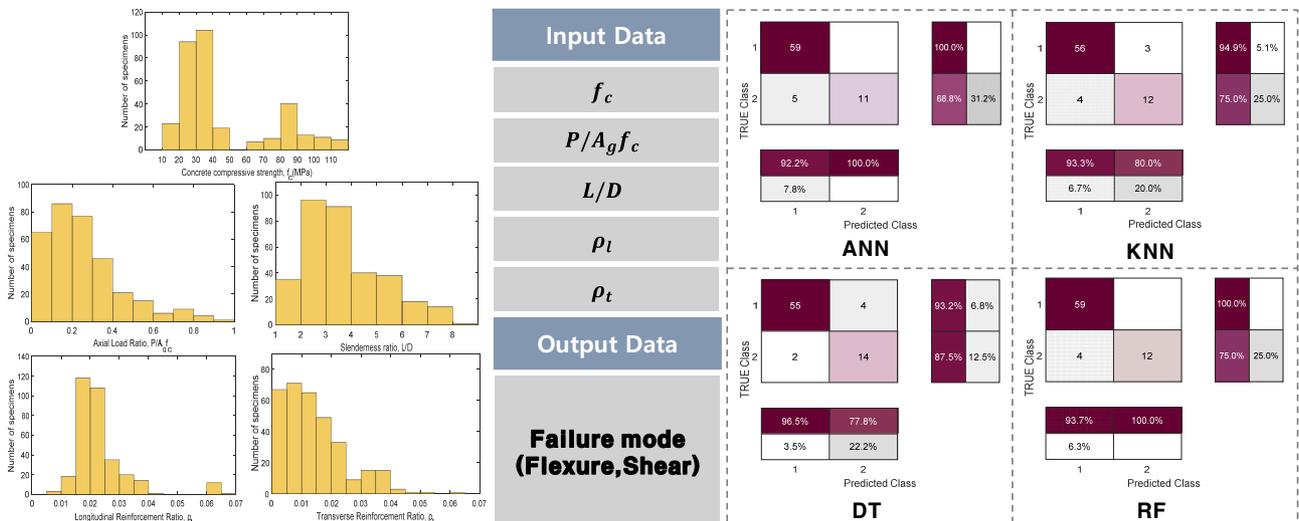


Fig. 3. Input data distributions and comparative confusion matrix for machine learning model performance

의 전단파괴유형에 대한 재현율이 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 실험 또는 해석 이전에 간단한 구조 상세정보(재료강도, 축력비, 형상비, 그리고 철근 상세정보 등)를 기반으로 파괴유형을 예측하는 경우, 보수적으로 예측할 수 있는 DT모델이 가장 합리적인 것으로 판단한다. 따라서 본 연구는 이전 연구에서 구축된 DT 모델을 활용하여 파괴유형 결정을 기반으로 하는 보강전략을 구축한다.

3. 기계학습기반 보강전략구축

3.1 구속비 및 강성비

본 연구에서 구속비(CR)와 강성비(SR)를 활용하여 보강전략을 구축한다. 구속비는 연성능력 향상에 기여하며 대표적인 예로 FRP재킷이 있다. FRP재킷에 의하여 발생하는 추가적인 구속압(Confining pressure)에 의하여 연성능력이 증가하고, 이는 기둥에 배치된 전단철근의 역할과 동일하다. 따라서 구속비에 따른 보강전략을 구속압(f_l)으로 설정하며 이는 FRP재킷 보강방법과 동일한 효과를 보인다. 구속비는 콘크리트 압축강도 대비 구속압의 비율을 나타낸 것이며, CR을 산정하는 식은 식 (1)에 제시하였다. CR의 계산에 활용된 구속압은 식 (2)에 제시하였고, 보강방법으로 FRP 재킷을 사용할 경우에는 식 (4)를 활용하여 구속압을 산정한다. 식 (3)에서는 구속압을 구하는 과정에 필요한 전단철근비를 산정하는 식을 제시하였다.

$$CR = f_l / f_c \tag{1}$$

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_s f_{yt} \text{ (MPa)} \tag{2}$$

$$\rho_s = \frac{A_l \times L_l}{A_c \times s} \tag{3}$$

$$\sigma_R = \frac{\nu_c}{\frac{R}{E_s t} + \frac{1 - \nu_c}{E_c}} \epsilon_{cc} \tag{4}$$

여기서, f_l 은 콘크리트에 대한 횡구속압력, ρ_s 는 전단철근체적비, f_{yt} 는 전단철근의 항복강도, A_c 는 구속된 콘크리트의 단면적, s 는 전단철근의 간격, A_l 는 전단철근의 단면적, L_l 는 전단철근의 총 길이, ν_c 은 콘크리트의 프아송비, R 은 FRP재킷의 반지름, E_s 는 FRP재킷의 탄성계수, t 는 FRP재킷의 두께, E_c 는 콘크리트의 할성계수, 그리고 ϵ_{cc} 는 구속 콘크리트의 축방향 변형률이다.

구속비가 특정 수준 이상일 때 기둥의 내진성능이 향상되므로 구속비의 최소값을 결정하는 것은 FRP로 보강된 콘크리트 기둥의 성능을 보장하는데 필수적이다. 이전 실험 연구[26-28]에서 FRP 기둥 재킷 시스템을 사용하여 최대 구속 콘크리트 강도(f_{cc})와 극한 변형률(ϵ_c)을 향상시키는 CR의 최소 한계(CR_{min} =0.07 및 0.15)를 제안하였다. 이는 FRP 재킷이 기둥에 충분한 구속압력을 제공하여 콘크리트의 압축강도를 높이고, 축방향 변형률을 증가시키는 데 필요한 최소한의 비율이다. 이러한 최소 구속비를 확보함

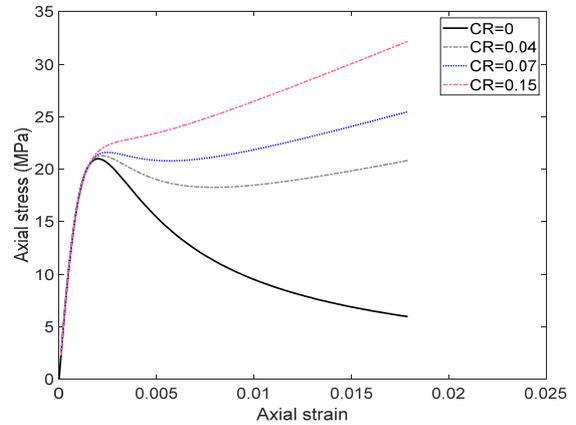


Fig. 4. Axial stress-strain relationships for confining pressure provided from FRP jacket

으로써, 기둥은 지진이나 다른 동적 하중 조건에서 더 큰 변형을 견딜 수 있다. 구속비의 최적 범위 결정은 구조물의 특정 내진 요구사항과 예상 지진 하중을 고려하여 이루어진다. 일반적으로 구속비가 높을수록 구조물의 내진 성능은 향상되지만, 이는 추가적인 비용과 재료 사용량을 요구한다. 따라서 경제성과 실용성을 고려하여 최적의 구속비 범위를 결정하는 것이 중요하다. 이전 연구에 따르면, 구속비가 0.07 이상 0.15 미만의 경우를 낮은 수준의 구속으로, 0.15 이상을 높은 수준의 구속으로 분류하여 보강효과를 분석한다. 이는 다양한 지진 하중 조건과 구조물의 내진설계 요구사항에 따라 FRP 재킷의 구속압력을 적절히 조절할 필요가 있음을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 선행연구 결과를 바탕으로 CR에 대한 값을 0.07과 0.15로 분류하여 보강전략을 구성하였다. Fig. 4는 CR 값의 변화에 따른 콘크리트 축력-변형률의 관계를 나타낸 것이다. CR 값이 0인 경우는 비구속 상태의 콘크리트의 거동을 보여주며, CR 값의 증가에 따라 구속 콘크리트 강도(f_{cc})와 재료의 연성능력이 향상되는 것을 볼 수 있다. CR 값이 0인 경우에 비해 CR 값이 0.04인 경우 최대강도가 1.4% 증가하고, CR 값이 0.07인 경우는 2.9%, 그리고 CR 값이 0.15인 경우는 53.2% 증가한다.

해당 콘크리트 축력-변형률의 관계는 과거연구[29]에 의하여 제안된 구속압 증가에 의한 콘크리트의 축력-변형률의 관계를 산정하는 방식을 활용하였다. Popovics[30]가 제안한 응력-변형 모델을 기반으로 하여 최대 응력 및 변형률을 결정하기 위해 최대 응력은 Mander et al.[31]이 제시한 식 (5)을 사용하고, 최대 변형률은 Richart et al.[32]이 제안한 식 (6)을 사용하였다. 또한 Gardner[33]이 연구한 3축 콘크리트 시험결과를 바탕으로 식 (7)을 기반으로 개발하였다.

$$f_{cc}^* = f_{co} \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l^*}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l^*}{f_{co}} - 1.254 \right) \text{ (MPa)} \tag{5}$$

$$\epsilon_{cc}^* = 5 \epsilon_{co} \left(\frac{f_{cc}^*}{f_{co}} - 0.8 \right) \tag{6}$$

$$\frac{\mu_s}{\nu_c} = (1.914 \frac{f_l}{f_{co}} + 0.719) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} + 1 \tag{7}$$

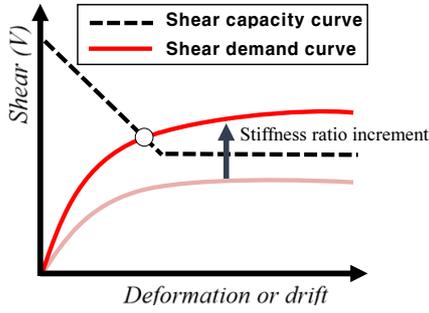


Fig. 5. Shear capacity and demand curves influenced by stiffness ratio increment

강성비는 구조물의 보강전략을 결정하는 데 중요한 요소 중 하나이다. 강성비는 보강 전후의 구조물 강성의 변화를 나타내며, 기둥의 단면 확장, 전단벽 추가, 가새 설치 등의 방법으로 강성비의 조정이 가능하다. 강성비는 비보강 상태 기둥의 초기강성 대비 단면 확장 후 보강된 기둥의 초기강성 비율을 의미한다. Fig. 5는 강성비 변화에 따른 전단성능곡선과 전단요구 곡선을 보여준다. 강성비 증가에 의하여 그림의 전단요구곡선은 상승할 수 있으며, 이에 따라 전단성능곡선을 초과할 수 있다. 이에 따라 해당 기둥은 취성파괴(전단파괴 또는 휨-전단파괴)가 발생할 가능성이 있다. 또한, 강성비 증가를 위한 기둥 부재의 단면 확장은 구속비를 감소시킬 수 있다. 즉, 구속비와 강성비는 식(3)에 제시된 것과 같이 서로 상충관계에 있으므로, 이를 고려하여 효과

적인 보강전략을 구축하여야 한다. Shin et al.[34]은 NSM(Near-surface mounted)-FRP 재킷 보강시스템에 대한 2개 단계에 의한 보강설계 방법론을 제안하였다. NSM 공법은 기둥의 휨성능(초기강성 그리고 최대강도)을 향상시킬 수 있지만, 기존 철근콘크리트 기둥의 전단성능을 초과하여 기둥의 조기파괴가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위하여 FRP 재킷을 활용하여 기둥의 전단성능을 향상시켜 연성거동을 유도하였다. 이를 통하여 건축물 전체의 횡방향성능(초기 강성, 최대강도 그리고 연성능력)을 극대화하여 비보강 골조 실험체에서 관찰된 연층현상을 완화할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2 기계학습 기반 최적 보강전략 방법론

본 연구는 기계학습을 활용하여 간단한 정보로 신속하게 최적의 보강전략을 수립하는 알고리즘을 개발한다. Fig. 6은 철근콘크리트 골조의 보강전략 구축 알고리즘을 보여준다. 과정은 크게 파괴유형결정, 내진성능수준 평가, 손상수준 비교 그리고 보강전략 구축으로 구분된다.

먼저 조적허리벽이 있는 철근콘크리트 학교 건축물의 1층 내부, 외부 기둥의 파괴유형을 본 연구에서 선정한 기계학습 모델로 예측한다. 결과가 휨 파괴유형일 경우, 내진 성능 수준을 산정하고 위험수준과 비교하여 위험수준보다 안전한 단계일 경우, 보강이 필요없다고 판단한다. 위험수준을 넘거나 1층 기둥에서 전단파괴가 발생할 경우, 조적허리벽을 제거하여 단주효과를 감소시킨다. 조적허리벽을 제거한 후, 다시 1층 기둥의 파괴유형을 기계

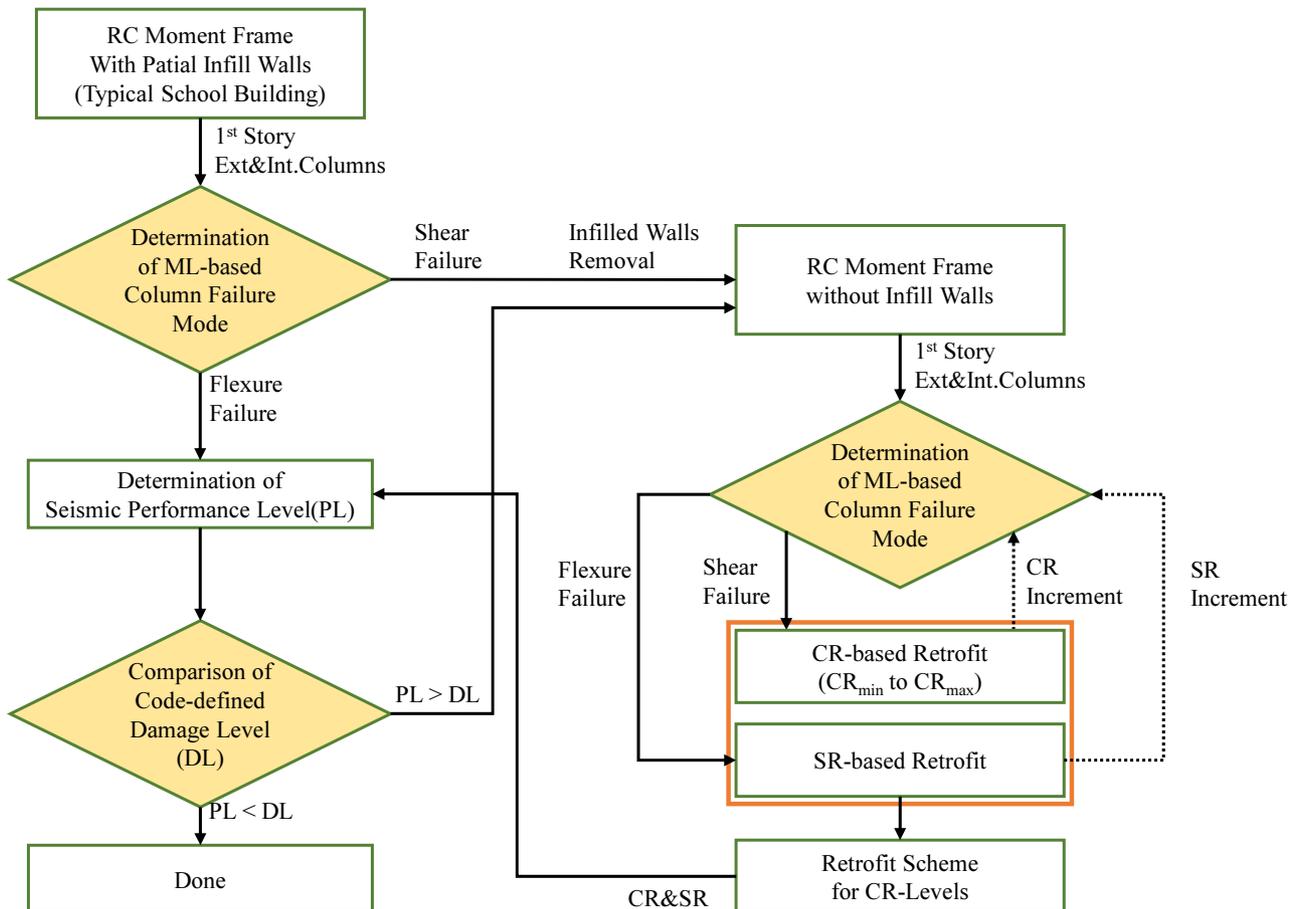


Fig. 6. Algorithmic flowchart for retrofit scheme development

학습 모델로 예측한다. 여기서 휨파괴유형으로 예측된다면 강성비를 활용하여 전단파괴가 발생하기 전까지의 강성비까지 보강한다. 이는 기존에 존재하던 조적허리벽을 제거함에 따라 건축물의 강성이 감소되므로 강성보강이 필요하기 때문이다. 전단파괴가 발생하기 전까지 강성보강을 진행함으로써 최대 허용 강성비를 제한한다. 전단파괴유형으로 예측된다면 구속비의 최소한계(CR_{min} to CR_{max})를 활용하여 보강한 후 강성비를 활용하여 전단파괴가 발생하기 전까지의 강성비까지 보강한다. 전단파괴는 구조물의 최대 성능을 발휘하기 전에 붕괴되는 것으로 이를 방지하기 위해 구속비를 증가시키는 연성보강을 수행하여야 한다. 과거 연구를 기반으로 구속비의 최소값과 최대값을 선정하여 각각 최소값과 최대값까지 구속비를 증가시킨 후, 강성비를 활용하여 전단파괴가 발생하기 전까지 강성비를 증가시킨다. 구속비와 강성비를 활용한 보강이 완료되면 성능수준을 판정하여 위험수준과 비교하여 판단한다. 이로써 연성능력과 함께 강성보강을 수행하는 보강전략의 구축을 수립하였다.

해당 알고리즘을 통해 여러 가지 보강전략을 신속하게 구축할 수 있다. 실험 및 해석을 기반으로 한 기존의 보강전략 구축방법에 비해 기계학습을 활용하여 보강전략을 구축함으로써 보강전략을 해당 알고리즘을 통해 신속하게 구축할 수 있다.

4. 학교건축물 보강전략 구축

본 연구는 80년대 문교부에서 발행한 ‘학교 교사 표준 설계도’를 참고한 3층 7경간 비내진 철근콘크리트 학교 건축물을 대상 건축물로 선정한다. 해당 모델은 조적허리벽으로 인한 단주효과의 영향으로 전단파괴에 지배적이다. 3장에서 개발한 보강전략 알고리즘을 적용하여 해당 모델에 맞는 보강전략을 제시하였다. 1층 기둥의 콘크리트 압축강도, 축력비, 형상비, 주철근비, 그리고 전단철근비의 값을 입력변수로 설정하여 3장에서 개발한 기계학습 기반 철근콘크리트 기둥 파괴유형 예측모델을 활용한 결과, 전단파괴가 발생하는 것으로 예측한다. 기존 학교 건축물은 철근콘크리트 건축물의 허리벽에 조적조를 이용한 비내력벽을 사용하고 있다. 비내력벽과 골조의 상호작용이 구조물의 성능에 미치는 영향에 대한 과거연구가 수행되었다[35]. 횡하중에 의해 비내력벽(조적허리벽)의 압축 스트럿 메커니즘이 발생하고, 이 스트럿에서 발생한 응력이 주변 기둥부재에 추가 전단하중으로 작용하여

비내력벽이 손상되어 철근콘크리트 골조와 분리되기 이전까지는 기둥에 부정적인 영향을 주게 된다. 또한, 기둥의 순경간이 감소하여 취성적인 전단파괴와 단주파괴 현상을 유발한다. 따라서 기존 학교 건축물에 연성능력 향상 등을 고려하여 조적허리벽을 제거하는 방법을 첫 번째 보강 방법으로 선정한다. 조적허리벽을 제거한 후 다시 파괴유형을 결정하는 기계학습을 기반으로 1층 기둥의 파괴유형을 판단한다. 휨파괴가 발생한다는 결과를 보였으므로 전단파괴가 발생하기 전까지 강성비를 증가시키는 보강을 진행한다. 조적허리벽 제거로 인해 강성과 강도가 현저히 낮아져 강성보강이 우선적으로 필요하므로 조적허리벽을 제거한 상태에서 강성비를 증가시키는 방법을 두 번째 보강방법으로 선정한다. Table 2은 강성비 기반 보강과정을 보여준다. 0.04의 CR 값을 보유한 기둥에 대하여 SR을 3.28배까지 증가시켰을 때 전단파괴가 발생한다. 따라서 전단파괴가 발생하기 이전까지 SR을 최대 3.09배까지 증가시킬 수 있다.

강성보강과 함께 연성보강을 고려한 보강전략을 구축하기 위해 전단파괴가 발생한 상태에서 각각 0.07과 0.15의 구속비로 연성보강을 수행한다. 연성보강을 수행한 후 다시 전단파괴가 발생하기 전까지 강성보강을 수행한다. 연성보강은 구조물의 변형 능력을 강화하여 지진 발생 시 주요 구조 요소가 파괴에 이르지 않고 에너지를 흡수 및 분산시키는 데 효과적이고 강성보강은 구조물의 초기강성을 증가시켜 전체적인 지진 에너지에 대한 저항력을 증가시킨다. 이러한 두 가지 보강방법을 결합함으로써, 구조물은 더 큰 연성과 적절한 강성을 동시에 갖추게 되어, 지진 발생 동안 구조적 안전성과 기능을 유지할 수 있다. Table 3은 구속비와 강성비 기반 연성보강과 강성보강을 모두 고려한 보강과정을 보여준다. CR_{min} (=0.07)과 CR_{max} (=0.15)으로 보강된 기둥에 대하여 SR을 각각 5.56배와 10.24배까지 증가시켰을 때 전단파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 기둥이 연성기둥(휨기둥)을 확보할 수 있는 SR의 최대값은 5.29(CR_{min} 기준) 그리고 9.84(CR_{max} 기준)로 나타났다.

3장에서 개발한 보강전략 알고리즘을 통해 본 연구의 대상 건축물의 보강 전략을 수립하였다. Table 4는 기둥의 파괴유형 분류 기계학습 모델을 활용한 신속한 보강전략 구축 방법론을 바탕으로 CR과 SR에 대한 보강전략을 보여준다. 비교를 위하여 비보강 상태의 CR과 SR 값을 함께 제시하였다. As-built 모델은 조적허리벽이 있는 비내진 철근콘크리트 학교 건축물이고, RW 모델은 As-built 모델에서 조적허리벽을 제거한 상태를 나타낸 것으로,

Table 2. Verification of stiffness ratio-based retrofitting process in RC structures using machine learning

CR	SR	$P/A_g f'_c$	f'_c (MPa)	L/D	ρ_l	ρ_t	Failure mode
0.04	1.00	0.125	21	5.37	0.016	0.0032	Flexure
	1.18	0.118		5.00		0.0033	Flexure
	1.38	0.112		4.68		0.0034	Flexure
	1.61	0.107		4.39		0.0035	Flexure
	1.85	0.102		4.14		0.0036	Flexure
	2.13	0.097		3.92		0.0036	Flexure
	2.42	0.093		3.72		0.0037	Flexure
	2.74	0.089		3.54		0.0038	Flexure
	3.09	0.086		3.37		0.0039	Flexure
	3.28	0.084		3.30		0.0040	Shear

Table 3. Verification of stiffness ratio & confinement ratio-based retrofitting process in RC structures using machine learning

CR	SR	$P/A_g f'_c$	f'_c (MPa)	L/D	ρ_l	ρ_t	Failure mode
$CR_{min} (0.07)$							
0.07	3.28	0.084	21	3.30	0.016	0.0075	Flexure
	3.88	0.080		3.09		0.0078	Flexure
	4.55	0.076		2.90		0.0081	Flexure
	5.29	0.072		2.74		0.0083	Flexure
	5.56	0.071		2.69		0.0084	Shear
$CR_{max} (0.15)$							
0.15	3.28	0.084	21	3.30	0.016	0.0163	Flexure
	3.67	0.081		3.15		0.0165	Flexure
	4.32	0.077		2.96		0.0171	Flexure
	5.04	0.073		2.79		0.0176	Flexure
	5.83	0.070		2.64		0.0182	Flexure
	6.71	0.066		2.50		0.0188	Flexure
	7.66	0.063		2.38		0.0193	Flexure
	8.71	0.061		2.27		0.0199	Flexure
	9.84	0.058		2.16		0.0204	Flexure
	10.24	0.058		2.13		0.0206	Shear

Table 4. Summary of parametric frame models using combination of retrofit parameters

Group	Model	CR	SR
As-built	As-built	0.04	1.00
Retrofitted	RW	0.04	1.00
	RWSR	0.04	3.09
	RWCR0.07	0.07	5.29
	RWCR0.15	0.15	9.84

해당 모델의 기동은 휨파괴유형으로 나타났다. RWSR 모델은 RW 모델의 기동 상세에 대하여 기계학습 모델에 의하여 전단파괴 유형으로 분류되기 이전까지 SR을 증가시킨 것으로, 비보강 모델 대비 약 3배 이상의 강성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. RWCR0.07 모델은 FRP 재킷을 활용하여 $CR_{min} (= 0.07)$ 을 확보했을 때 기동에 전단파괴가 발생하기 전까지 SR을 5.29배를 증가시킬 수 있다. 마지막으로, RWCR0.15 모델은 보강된 기동이 $CR_{max} (= 0.15)$ 을 보유했을 때 기동이 전단파괴 발생하기 이전까지 SR을 9.84배 증가시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 이를 통하여 기동의 파괴유형을 분류할 수 있는 기계학습 모델을 활용하여 신속하게 다양한 보강전략을 구축할 수 있는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 기동의 간단한 구조상세 정보만으로 철근콘크리트 기동의 파괴유형을 예측할 수 있는 기계학습 모델을 활용하여 구속비와 강성비에 대한 내진보강전략을 구축하는 방법론을 제시하였다. 이를 지진에 취약한 학교 건축물을 대상으로 적용하였으며, 이에 대한 결론은 아래와 같다.

1) 간단한 기동 구조상세 정보(축력비, 재료강도, 형상비, 휨철근비 그리고

전단 철근비)를 통하여 빠른 속도로 파괴유형을 분류할 수 있는 기계학습 모델을 활용하여 신속하게 최적 보강전략을 구축할 수 있는 방법론을 개발하였다. 해당 방법론은 기동의 연성거동(휨파괴)을 목표로 구속비(연성능력 향상)와 강성비(초기강성 및 최대강도 증가)에 대한 최적의 보강 전략을 상세해석모델 개발 및 반복 계산 없이 신속하게 도출할 수 있다.

2) 파괴유형 분류 기계학습모델 연계 최적 보강전략 도출 방법론은 지진에 취약한 학교 건축물에 적용되었다. 대상 학교 건축물의 기동은 단주효과에 의하여 전단파괴가 발생하였으며, 이를 과거 연구에서 제시된 구속비의 최소(CR_{min}) 및 최대(CR_{max}) 범위 내에서 전단파괴 발생 이전까지 적용가능한 최대 강성비를 제시하였다. 구속비의 최소 범위($CR_{min} = 0.07$)에서 강성비는 비보강 기동 대비 5.29배까지 고려할 수 있는 것으로 나타났으며, 구속비의 최대 범위($CR_{max} = 0.15$)에서 강성비는 최대 9.84배 까지 증가할 수 있는 것을 볼 수 있다. 해당 보강전략은 조적허리 벽을 제거한 기동에 대하여 구속비의 최소 및 최대값에 대한 강성비 증가 허용 범위를 제시한 것이다. 과거 건축물의 경우 SBWC(Strong-Beam & Weak Column) 시스템으로 구성되어 있으므로, 보 부재에서 파괴가 선행될 수 있다. 따라서 추후 연구에서 수평부재에 대한 보강전략을 함께 고려할 예정이다.

3) 본 연구에서 개발된 신속 보강전략 구축 방법론의 검증은 위하여 구속비

에 따른 강성비를 반영할 수 있는 대상 건축물에 대한 상세 구조해석모델의 개발과 해당 모델에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하여 변위 저감을 포함한 보강효과를 분석할 예정이다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00348713) 및 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021IRIS-003)의 결과임.

/ REFERENCES /

1. Choi I, Kim D, Kim J. Optimal retrofit quantity of exterior steel brace methods on minimizing seismic loss for non-ductile reinforced concrete school buildings in Korea. *Bull Earthquake Eng.* 2023 Nov;22:1055-1079.
2. O'Reilly GJ, Perrone D, Fox M, Monteiro R, Filiatrault A. Seismic assessment and loss estimation of existing school buildings in Italy. *Engineering Structures.* 2018 Aug;168:142-162.
3. Al-Bukhaiti K, Yanhui L, Shichun Z, Abas H, Daguang H, Nan X, Lang Y, Xing Yu Y. Effect of the axial load on the dynamic response of the wrapped CFRP reinforced concrete column under the asymmetrical lateral impact load. *PLoS One.* 2023 Jun;18(6).
4. Shin J, Jeon JS, Kim J. Numerical column model for damaged non-ductile reinforced concrete frame repaired using FRP jacketing system. *J Earthq Eng Soc Korea.* 2018 Jul;22(5):291-298.
5. Kim KM, Lee SH, Oh SH. Seismic Performance Evaluation of Existing Low-rise RC Frames with Non-seismic Detail. *J Earthq Eng Soc Korea.* 2013 May;17(3):97-105.
6. Shin J. Forced vibration testing of full-scale non-seismic reinforced concrete frame structure retrofitted using FRP jacketing system. *J Earthq Eng Soc Korea.* 2018 Jul;22(5):281-289.
7. Shin KJ, Lee SH, Lee HD, Kwon HS. Seismic-strengthening effect of steel shear wall with circular opening through shaking table test on reinforced concrete frame. *The Regional Association of Architectural Institute of Korea.* 2016 Jan;18(2):107-114.
8. Wang Y, Chen W, Li D, Xu H, Zhang F, Guo X. Experimental and numerical investigations of the seismic performance of reinforced concrete frames strengthened with CFRP sheets. *Buildings.* 2023 Aug;13(9):2195.
9. Shin J, Scott DW, Stewart LK, Yang CS, Wright TR, DesRoches R. Dynamic response of a full-scale reinforced concrete building frame retrofitted with FRP column jackets. *Engineering Structures.* 2016 Oct;125:244-253.
10. Song MA, Lee S, Lee K. Seismic Performance Evaluation of the Low-Rise Buildings with Different Seismic Retrofit Procedures. *J Earthq Eng Soc Korea.* 2016 Dec;20(7_spc):553-560.
11. Ozkul TA, Kurtbeyoglu A, Borekci M, Zengin B, Kocak A. Effect of shear wall on seismic performance of RC frame buildings. *Eng Fail*

- Anal.* 2019 Jun;100:60-75.
12. Berry M, Parrish M, Eberhard M. PEER structural performance database user's manual (version 1.0). Berkeley: University of California; c2004.
13. Yoshikawa H, Miyagi T. Ductility and Failure Modes of Singly Reinforced Concrete Columns. *Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures Under Seismic Loads: American Society of Civil Engineers;* c2001, p. 35-368.
14. Sezen H, Moehle JP. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns. *J Struct Eng.* 2004 Oct;130(11):1692-1703.
15. Sheikh SA, Yeh CC. Flexural behavior of confined concrete columns. *In Journal Proceedings.* 1986 May;83(3):389-404.
16. Mo YL, Wang SJ. Seismic behavior of RC columns with various tie configurations. *J Struct Eng.* 2000 Oct;126(10):1122-1130.
17. Priestley MJ, Park R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading. *Structural Journal.* 1987 Jan;84(1): 61-76.
18. Bažant ZP, Kwon Y. Failure of slender and stocky reinforced concrete columns: Tests of size effect. *Materials and Structures.* 1994 Mar; 27: 79-90.
19. Korea Road Research Institute. Behavior of RC Columns and Composite Columns using High Strength Concrete. Korea Expressway Corporation; c1999. Korean.
20. Shi Q, Ma L, Wang Q, Wang B, Yang K. Seismic performance of square concrete columns reinforced with grade 600 MPa longitudinal and transverse reinforcement steel under high axial load. *In Structures.* 2021 Aug;32:1955-1970.
21. Mo YL, Wang SJ. Seismic behavior of RC columns with various tie configurations. *J Struct Eng.* 2000 Oct;126(10):1122-1130.
22. Wang X, Zhang Y, Su Y, Feng Y. Experimental investigation on the effect of reinforcement ratio to capacity of RC column to resist lateral impact loading. *Systems Engineering Procedia.* 2011;1:35-41.
23. Grgić N, Radnić J, Smilović M., Baloević G. The shake-table study of the effect of longitudinal reinforcement ratio on the behavior of concrete cantilever columns: Rütteltischuntersuchung über den Einfluss des Längsbewehrungsverhältnisses auf das Verhalten von Betonkragarmen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.* 2018 May;49(5):606-618.
24. Karaton M., Awla HA. Numerical investigation of the effect on ultimate loading capacity of different longitudinal reinforcement ratios of a RC portal frame. *J Struct Eng.* 2018 Oct;1(3):147-154.
25. Kim S, Oh K, Shin J. Machine Learning-Based Rapid Prediction Method of Failure Mode for Reinforced Concrete Column. *J Earthq Eng Soc Korea.* 2024 Mar;28(2):113-119.
26. Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, Echary HE, Mastrapa JC, Pico O. Effect of column parameters on FRP-confined concrete. *Journal of Composites for construction.* 1998 Nov;2(4):175-185.
27. Spoelstra MR, Monti G. FRP-confined concrete model. *Journal of composites for construction.* 1999 Aug;3(3):143-150.
28. Shin J, Jeon JS. Seismic damage mitigation strategy using an FRP column jacketing system in gravity-designed reinforced concrete

- building frames, *Composite Structures*, 2022 Jan;279:114700.
29. Fam AZ, Rizkalla SH. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes, *Structural Journal*, 2001 Jul;98(4):451-461.
 30. Popovics S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and concrete research*, 1973 Sep;3(5): 583-599.
 31. Mander JB, Priestley MJ, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J Struct Eng*. 1988 Sep;114(8):1804-1826.
 32. Richart FE, Brandtzaeg A, Brown RL. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, In: *Bulletin no. 185*, Univ. of Illinois, Eng. Experimental Station: Champaign, Ill; c1928.
 33. Gardner NJ. Triaxial behavior of concrete, *ACI L*, 1969 Feb;66(2): 136-146.
 34. Shin J, Jeon JS, Wright TR. Seismic mobile shaker testing of full-scale RC building frames with high-strength NSM-FRP hybrid retrofit system, *Composite Structures*, 2019 Oct;226:111207.
 35. Fiorato AE. An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls, University of Illinois at Urbana-Champaign; c1971.