

1980년대 학교교사에 대한 보, 기둥 및 접합부 사이의 파괴모드 분석

Analysis of Failure Modes among Beams, Columns, and Joints for School Buildings Constructed in the 1980s

최명호*
Choi, Myeong-Ho

하세연**
Ha, Se-Yeon

이창환***
Lee, Chang-Hwan

Abstract

As earthquakes continue to occur in Korea in recent years, seismic evaluation and retrofit of existing school buildings have been carried out. Many domestic school buildings were built using or referring to standard drawings. Therefore, if the overall structural characteristics of a school building can be known first based on standard drawings, it can be provided as valuable data for detailed seismic evaluation. For this reason, this study investigated the weak structural components and failure modes by comparing the strength of beams, columns, and joints constituting standard school buildings constructed in the 1980s. The evaluation was performed for different types of standard drawings and different material strengths. The results showed that the joint was mainly the weakest due to the eccentricity, and the failure modes were partially changed depending on the material strength.

Keywords : School buildings, Standard drawings, Beam-column joint, Failure mode, Eccentricity

1. 서론

기상청에서 최근 발표한 통계자료에 따르면 1990년대에 규모 2.0 이상 지진의 국내 연평균 발생 횟수는 25.3회, 2000년대에는 43.4회, 그리고 2010년부터 2020년까지는 108.2회로 나타났다¹⁾. 이처럼 지진의 발생빈도가 높아짐에 따라 기존 공공시설물을 중심으로 내진보강이 지속적으로 진행되어 왔다. 지진 등 재난발생 시 대피장소로 많이 활용되는 학교 건물의 경우, 2005년에 이르러서야 3층 이상에 대해 내진설계가 의무화되었고, 직전년도인 2004년까지 건립된 비율은 전체의 약 88%이다²⁾. 행정안전부 공공시설물 내진성능 확보 현황에 따르면 2020년 말 기준으로 전체 내진율이 70.2% 확

보된 반면, 학교시설의 내진율은 55.8%로 나타났다³⁾. 2020년 한해 중 학교건물에 가장 많은 투자를 하였음에도 아직 내진보강의 수요가 많은 상황이다.

현재 국내에서는 기존 건축물의 내진성능 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee et al.(2009)은 1980년대 학교건물의 내진성능 평가방법을 소개하며, 국내 학교건물을 대상으로 일본의 내진진단 기준을 적용하여 성능을 평가하였다. 또한, 저층 RC 건물의 내진성능을 짧은 시간에 효율적으로 평가를 할 수 있는 내진성능 평가법을 제안하였다⁴⁾. Lee et al.(2008)은 국내 및 일본 내진규준을 따라 국내 학교건물의 내진성능 평가를 진행하여 내진기준에 적합한 내진보강 방안을 제시하였으며⁵⁾, Yi(2004)와 Lee et al.(2006)은 국내·외 내진성능 평가 방법을 소개하며, 내진성능 평가의 속도를 높일 수 있는 참고자료로 제시하였다^{6,7)}. 이와 같이 국내 학교건물의 빠른 내진화를 위해 수행된 선행 연구에서는 수월한 내진성능 평가를 위한 자료들이 중요한 역할을 할 것으로 판단되었다.

이러한 배경으로 본 연구에서는 학교건물 내진성능 확보의 속도를 높이기 위한 참고자료를 제시하기 위해 표준설계도를 분석하는 것에 중점을 두었다. 대부분의 초·중·고 건물

* 학생회원, 부경대학교 건축·소방공학부, 석사과정
Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University
** 학생회원, 부경대학교 건축공학과, 학사과정
Department of Architectural Engineering, Pukyong National University
*** 교신저자, 정회원, 부경대학교 건축공학과, 조교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Pukyong National University
Tel: 051-629-6087 Fax: 051-629-7084
E-mail: chlee@pknu.ac.kr

은 표준설계도를 따라 지어졌기에 이를 분석하는 것은 상세 성능평기에 앞서 기초자료를 제공하는 역할을 할 수 있을 것이다. 학교건물에 대한 표준설계도는 1962년 최초 제정되어 1992년 의무조항이 폐지되었음에도 불구하고, 이후 건설된 학교들 또한 대부분 표준설계도를 바탕으로 설계되었기 때문에 이를 분석한 결과의 적용 범위는 넓을 것으로 예상된다.

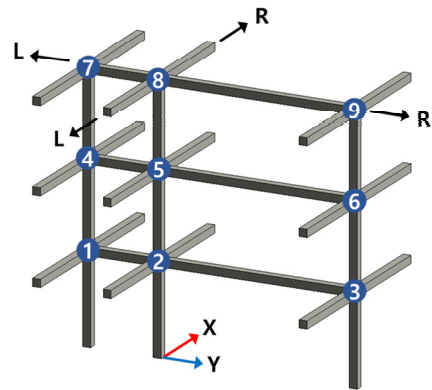
본 연구에서는 사용년수가 30~40년 되어 내진성능 평가 및 보강에 대한 수요가 많을 것으로 예상되는 학교건물을 대상으로 하였고, 이를 위해 80년도 학교교사 표준설계도⁹⁾를 분석하였다. 먼저 표준설계도의 유형과 재료강도를 변수로 하여 분석 대상을 구분하였다. 이후 구조요소인 보, 기둥 및 접합부의 상세를 바탕으로 전단강도와 휨강도를 산정하였고, 각 강도 값을 접합부에 가해지는 수평 전단강도로 치환하였다. 산정된 각각의 전단강도를 비교하여 취약부재 및 파괴모드를 파악하고, 이를 종합하여 최종적으로 내진보강을 위한 기초자료를 제시한다.

2. 분석 방법

2.1 분석 대상

본 연구에서 대상으로 하는 80년도 학교교사 표준설계도는 지역 특성에 따라 가(도시지역), 나(농촌지역), 다(관광지역), 라(도서벽지지역)의 4가지 유형으로 나뉘며, 국교와 중교를 대상으로 작성되었다. 국교(가), 중교(나), 중교(다), 중교(라)에 대한 설계도서 확인이 가능하였고, 이중 중교(나)와 중교(다)의 경우 옥상층 난간을 제외한 나머지 평면이 일치하여 국교(가), 중교(나), 중교(라)의 3가지 경우에 대한 분석을 수행하였다.

구조부재의 파괴순서 분석은 표준설계도 상에서 가장 많은 분포를 차지하는 내부골조를 대상으로 하였고, 접합부를 기준으로 <Fig. 1>과 같이 번호를 지정하였다. 또한 국교(가) 및 중교(나)에서는 2층과 3층 접합부에서의 조건이 동일하거나 유사한 이유로, 1에서 6번까지의 접합부에 대해 1,4번, 2,5번, 3,6번으로 통합하였다. 수평 지진력 작용은 X축과 Y축의 두 방향으로 검토하였고, 각 축에 대해 양방향 거동을 고려하여 왼쪽(L)과 오른쪽(R)으로 나누었다. 이와 같은 접합부 위치와 거동 조건에 따른 검토 대상의 수는 국교(가)와 중교(나)형의 경우 총 24가지, 중교(라)형에 대해서는 12가지였다.



<Fig. 1> Analyzed frame

적용된 재료강도, 즉 콘크리트의 설계기준압축강도(f_{ck})와 철근의 설계기준항복강도(f_y)의 선정에는 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령⁹⁾에 제시된 건축물의 건설 연도별 강도 기본값을 참조하였다. 1980년대에 건설된 건물을 가정하여 f_{ck} 와 f_y 가 각각 1) 15 MPa, 240 MPa, 2) 18 MPa, 240 MPa, 3) 18 MPa, 300 MPa, 4) 21 MPa, 300 MPa인 4가지 조합에 대하여 검토를 수행하였다. 대상을 분석함에 있어 기둥의 축력과 조적벽의 구조적 역할은 고려하지 않았으며, 피복두께는 40mm로 가정하였다.

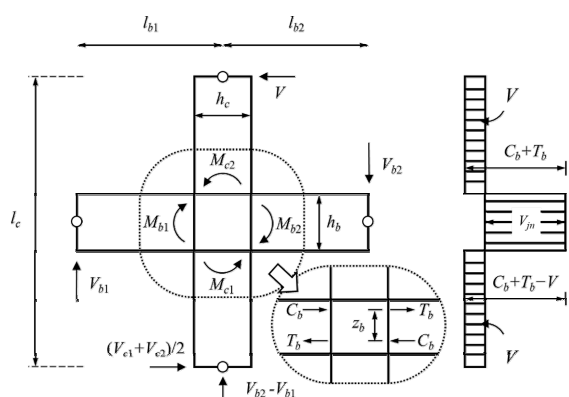
2.2 분석 과정

검토 조건에 따른 접합부 위치별 파괴모드를 보의 휨파괴, 보의 전단파괴, 기둥의 휨파괴, 기둥의 전단파괴 및 접합부 전단파괴의 총 5가지로 구분하여 산정하였다. 부재 단면 및 배근상세를 통해 강도를 산정한 후, 파괴의 우선순위를 비교하기 위한 값으로의 치환을 위해 Kim et al.(2016)에서 제시한 방법을 참고하였다¹⁰⁾.

<Fig. 2>에서 V 는 외부에서 가해지는 수평력을 의미한다. 5가지의 파괴모드인 보의 휨강도, 보의 전단강도, 기둥의 휨강도, 기둥의 전단강도 및 접합부의 전단강도에 도달할 때의 수평력을 각각 V_{mb} , V_{vb} , V_{mc} , V_{vc} 및 V_j 로 정의하였고, 이를 각 파괴모드에 대한 접합부 중심에서의 치환 전단력이라고 표현하였다.

2.2.1 보 및 기둥

<Fig. 2>의 자유물체도에는 보의 휨강도(M_b), 기둥의 휨강도(M_c), 보의 전단강도(V_b), 기둥의 전단강도(V_c)가 표현되어 있다. 보와 기둥은 <Fig. 2>에 주어진 힘들



<Fig. 2> Free body diagram of interior joints

의 모멘트 평형조건으로 검토되었으며, 변곡점은 부재의 중간위치로 단순화되었다. l_b 는 기둥 중심에서 보의 변곡점까지 거리이고, l_c 는 기둥 변곡점 사이의 거리를 나타낸다. 강도와 거리에 대한 기호에서 추가로 붙여진 숫자는 양쪽의 값들이 다른 경우를 고려하기 위한 것이다. 실제 자유물체도에는 추가적인 내·외력이 존재하지만, <Fig. 2>는 본 산정을 위해 필요한 힘의 요소만으로 단순화된 것이다. 모멘트 평형에 따라 V 는 다음의 식 (1)과 (2)로 표현된다.

$$V \times l_c = V_{b1} \times l_{b1} + V_{b2} \times l_{b2} \quad (1)$$

$$V = \frac{V_{c1} + V_{c2}}{2} \quad (2)$$

식 (1)에서 V_{b1} 및 V_{b2} 는 식 (3)으로 계산될 수 있고, 이를 대입하면 보의 휨파괴에 대한 접합부 치환 전단력(V_{mb})은 식 (4)를 통해 산정할 수 있다.

$$V_b = \frac{M_b}{(l_b - 0.5h_c)} \quad (3)$$

$$V_{mb} = \frac{M_{b1}}{l_{b1} - 0.5h_c} \left(\frac{l_{b1}}{l_c} \right) + \frac{M_{b2}}{l_{b2} - 0.5h_c} \left(\frac{l_{b2}}{l_c} \right) \quad (4)$$

여기서, h_c 는 기둥 단면의 깊이이다. 보의 전단파괴에 대한 접합부 치환 전단력(V_{vb})은 단면해석을 통해 산정된 V_b 를 식 (1)에 대입하여 식 (5)로 정리된다.

$$V_{vb} = V_{b1} \times \left(\frac{l_{b1}}{l_c} \right) + V_{b2} \times \left(\frac{l_{b2}}{l_c} \right) \quad (5)$$

V_c 는 식 (6)으로 계산되는데, 이를 식 (2)에 대입하면, 기둥의 휨항복에 대한 접합부 치환 전단력(V_{mc})을 식 (7)과 같이 산정할 수 있다.

$$V_c = \frac{2M_c}{l_c - h_b} \quad (6)$$

$$V_{mc} = \frac{M_{c1} + M_{c2}}{l_c - h_b} \quad (7)$$

여기서, h_b 는 보 단면의 깊이이다. 기둥의 전단파괴에 대한 접합부 치환 전단력(V_{vc})은 단면해석을 통해 산정된 V_c 를 식 (2)에 대입하여 식 (8)과 같이 정리된다.

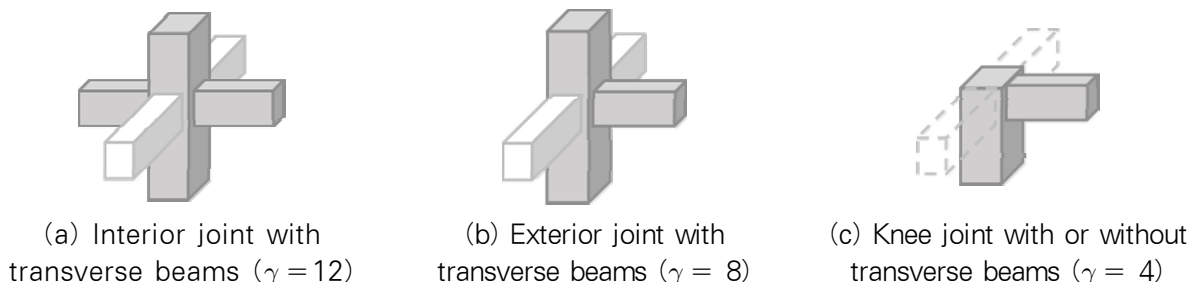
$$V_{vc} = \frac{V_{c1} + V_{c2}}{2} \quad (8)$$

2.2.2 접합부

ASCE 41-13¹¹⁾에 따른 접합부의 전단강도(V_{jn})는 식 (9)를 통해 산정된다.

$$V_{jn} = 0.083\gamma \sqrt{f_{ck}} A_j \quad (9)$$

여기서, γ 는 접합부의 위치와 직교보의 유무에 따른 강도산정 계수이며, ASCE 41-13에서 제시한 계수 중 일

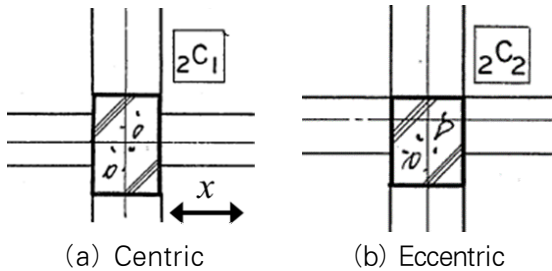


<Fig. 3> Joint classification (non-conforming transverse reinforcement)

부를 (Fig. 3)에 나타내었다. A_j 는 접합부의 유효 횡단 면적이며 기둥 단면 치수와 접합부 너비의 곱으로 구할 수 있다. 접합부 너비는 다음의 값들 중 최솟값을 사용한다.

- 1) 골조방향 기둥의 폭
- 2) 보폭과 골조방향 기둥 깊이의 합
- 3) 기둥과 연결된 보 중심에서 기둥 측면까지의 거리 중 작은 값의 2배

위 조건 중 3)번에 의해 연결되는 보의 편심 영향이 고려되는데, 편심률이 클수록 접합부 강도가 낮게 산정된다. 표준설계도 상에서는 (Fig. 4)에 나타난 것처럼 X 방향의 골조에 편심이 존재하는 것으로 확인되었다.



(a) Centric (b) Eccentric
 <Fig. 4> Examples of beam-column connections in standard drawings⁸⁾

<Fig. 2>를 참조하면, V_{jn} 은 식 (10)과 같이 T_{b1} 과 C_{b2} 의 합에서 V 를 뺀 값으로 계산할 수 있다.

$$V_{jn} = C_{b2} + T_{b1} - V \quad (10)$$

where, $T_{b1} \approx M_{b1}/z_b$, $C_{b2} \approx M_{b2}/z_b$

V 의 작용으로 보의 변곡점 위치에는 반력 V_{b1} 과 V_{b2} 가 발생하고, 기둥 경계면에서 보에 작용하는 휨모멘트 M_{b1} 과 M_{b2} 는 각각 $V_{b1}(l_{b1} - 0.5h_c)$ 및 $V_{b2}(l_{b2} - 0.5h_c)$ 가 된다. 모멘트 팔 길이를 나타낸 z_b 는 보 단면 유효깊이(d_b)의 0.87배로 산정하였다¹²⁾. 따라서 식 (9)에서 산정된 V_{jn} 을 식 (10)에 대입한 후 정리하면, 식 (11)을 거쳐 식 (12)와 같이 V_j 를 산정할 수 있다.

$$V_{jn} = (V_{b1} + V_{b2}) \left(\frac{l_b - 0.5h_c}{z_b} \right) - V_j \quad (11)$$

$$= V_j \left(\frac{l_c}{l_b} \right) \left(\frac{l_b - 0.5h_c}{z_b} \right) - V_j \quad (12)$$

3. 분석 결과

앞서 기술된 산정과정을 통해 분석된 결과를 교사 유형, 재료강도, 접합부 위치 및 거동조건에 따라 종합하였으며, 이는 <Table 1>~<Table 3>에 요약된다. 파괴가 먼저 발생하는 모드를 순서에 따라 1번에서 5번까지로 나타냈고, 맨 우측에는 해당 모드의 파괴가 가장 먼저 발생하는 경우의 수가 합산되어 있다.

3.1 국교(가)형

국교(가)형의 결과는 <Table 1>에 제시된다. 재료강도가 다른 모든 경우에 대해 가장 취약한 모드의 평균 발생 수는 접합부 전단파괴가 11.5회, 보의 휨파괴가 8.75회, 기둥의 휨파괴가 3.75회로 나타났으며, 보와 기둥의 전단파괴는 최초로 발생한 경우가 없었다.

X방향으로는 7X를 제외한 모든 위치에서 편심을 가졌는데, 2.5X와 7X를 뺀 모든 경우에서 V_j 가 가장 작게 산정되었다. 이는 편심의 영향으로 접합부 전단강도가 작아졌기 때문으로 판단된다. 2.5X의 경우 f_{ck} 가 15 및 18 MPa이고 f_y 가 240 MPa일 때는 V_{mb} 가 가장 작았지만, f_{ck} 가 18 및 21 MPa이고 f_y 가 300 MPa일 때는 V_j 가 가장 작게 나타났다. 이는 2.5X에 대해 재료강도에 따른 구조요소 강도 값의 변화를 나타낸 <Fig. 5>를 통해서도 확인할 수 있는데, 철근의 강도 증가에 따른 보의 휨강도 증가폭이 콘크리트의 강도 증가에 따른 접합부 전단강도 증가폭보다 커진 영향으로 볼 수 있다. 7X의 경우 편심이 존재하지 않아 다른 접합부에 비해 V_j 값이 비교적 높게 산정되어, 다른 파괴모드가 지배적이었다.

〈Table 1〉 Summary of result for Type “7F”

| Material strength (MPa) | Mode | 1,4X | | 1,4Y | | 2,5X | | 2,5Y | | 3,6X | | 3,6Y | | 7X | | 7Y | | 8X | | 8Y | | 9X | | 9Y | | Total | |
|------------------------------|----------|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|----|
| | | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | | |
| $f_{ck} = 15$ $f_y = 240$ | V_j | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 10 | |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 10 | |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | |
| | V_j | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 9 |
| $f_{ck} = 18$ $f_y = 240$ | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 10 | |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | |
| | V_j | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 15 |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 7 |
| $f_{ck} = 18$ $f_y = 300$ | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | |
| | V_j | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 12 |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| $f_{ck} = 21$ $f_y = 300$ | V_{mc} | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | |

〈Table 2〉 Summary of result for Type “L”

| Material strength (MPa) | Mode | 1,4X | | 1,4Y | | 2,5X | | 2,5Y | | 3,6X | | 3,6Y | | 7X | | 7Y | | 8X | | 8Y | | 9X | | 9Y | | Total | | | |
|------------------------------|----------|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|---|----|---|
| | | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | | | | |
| $f_{ck} = 15$ $f_y = 240$ | V_j | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 7 | | |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 8 | |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | |
| | V_{mc} | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 9 | |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 | |
| | V_j | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 6 | |
| $f_{ck} = 18$ $f_y = 240$ | V_{mb} | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 8 | |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | |
| | V_{mc} | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 | |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | |
| | V_j | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 13 | |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 7 |
| $f_{ck} = 18$ $f_y = 300$ | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 | |
| | V_j | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 12 | |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 8 |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| $f_{ck} = 21$ $f_y = 300$ | V_{mc} | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 | |
| | V_j | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 12 | |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 8 |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 |
| $f_{ck} = 21$ $f_y = 300$ | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 | |
| | V_j | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 12 | |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 8 |
| | V_{tb} | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 |

〈Table 3〉 Summary of result for Type “라”

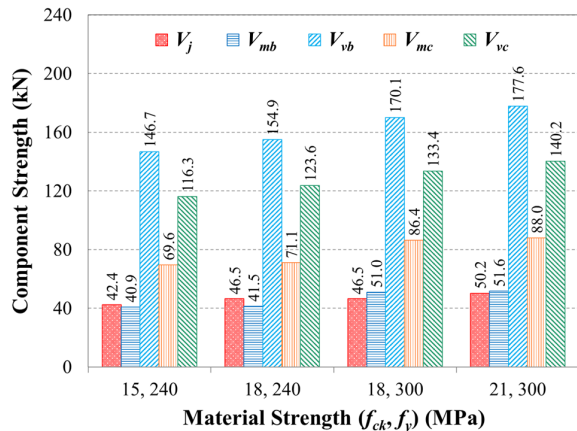
| Material strength (MPa) | Mode | 7X | | 7Y | | 8X | | 8Y | | 9X | | 9Y | | Total |
|------------------------------|----------|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|
| | | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | L | R | |
| $f_{ck} = 15$ $f_y = 240$ | V_j | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 4 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| | V_{vb} | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| | V_{mc} | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 6 |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 |
| $f_{ck} = 18$ $f_y = 240$ | V_j | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 |
| | V_{mb} | 1 | 1 | 4 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 | 4 |
| | V_{vb} | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 |
| $f_{ck} = 18$ $f_y = 300$ | V_j | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 5 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| | V_{vb} | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| | V_{mc} | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 6 |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 |
| $f_{ck} = 21$ $f_y = 300$ | V_j | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 6 |
| | V_{mb} | 3 | 3 | 4 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| | V_{vb} | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 |
| | V_{mc} | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 |
| | V_{vc} | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 0 |

Y방향으로는 접합부에 편심이 존재하지 않아 상대적으로 V_j 가 V_{mb} 보다 크게 산정되었다. 내부접합부 형태인 2,5Y는 V_{mc} 가 지배적이었으나, 2,5X와 같은 이유로 V_j 가 작게 나타난 경우도 있었고, 8Y는 V_j 가 가장 작게 나타났다. 외부접합부의 형태인 나머지 경우에는 주로 V_{mb} 가 낮게 산정된 결과를 보였다. 2,5Y와는 달리 최상층 내부접합부인 8Y에서 접합부 전단파괴가 지배적이었던 것은 최상층과 일반층에 대한 γ 계수 설정에 차이가 있었기 때문으로 판단된다. 일반층의 경우 내부접합부와 외부접합부에 대해 γ 가 각각 12와 8로 구분되어 있지만(Fig. 3 (a,b)), 최상층에 대해서는 내부와 외부의 구분없이 γ 는 4로 동일하다(Fig. 3 (c)). 즉 일반층과 최상층의 계수 감소 비율이 외부접합부에서보다 내부접합부에서 커져 상대적으로 작은 V_j 가 산정된 것이다.

3.2 종교(나)형

종교(나)형의 결과는 〈Table 2〉에 제시된다. 가장 취약한 모드의 평균 발생 수는 접합부 전단파괴가 9.5회, 보의 휨파괴가 7.75회, 기둥의 휨파괴가 6.75회로 나타났다. 국교(가)형과 마찬가지로 보와 기둥의 전단파괴가 지배적인 경우는 없었다.

X방향에 대한 결과는 국교(가)형과 유사하게 나타났다. X방향으로는 3,6X를 제외한 모든 위치에서 편심을 가졌는데, 2,5X, 8X 및 9X에서는 편심의 영향으로 인해 V_j 가 가장 작게 산정되었다. 1,4X의 경우 f_y 가 240 MPa일 때는 V_{mc} 가 지배적이었지만, f_y 가 300 MPa인 경우에는 앞서 언급한 국교(가)형의 2,5X와 같은 이유로 V_j 가 가장 작은 결과를 보였다. 7X의 경우 일반층인



〈Fig. 5〉 Variations of component strength with material strength

1,4X에서보다 보의 폭이 넓어 A_j 가 증가한 영향으로 V_j 가 커지게 되었고, 이로 인해 V_{mc} 가 가장 취약한 것으로 나타났다. 3,6X는 편심이 존재하지 않기에 V_j 의 값이 상대적으로 높게 나타나 V_{mb} 에 의해 파괴가 지배되었다.

Y방향으로는 국교(가)형과 마찬가지로 편심이 존재하지 않았다. 외부접합부에 해당하는 1,4Y와 3,6Y에서는 V_{mb} 가 가장 작게 나타났다. 최상층 외부접합부에 해당하는 7Y와 9Y에서는 보의 상·하부 배근량 차이에 의한 영향이 크게 나타나 가력 방향에 따라 파괴모드가 다르게 나타났다. 2,5Y와 8Y는 국교(가)형의 2,5X와 같은 이유로 재료강도의 변화에 따라 V_{mb} 와 V_j 의 순서가 교대되었다.

3.3 중교(라)형

중교(라)형은 타 유형과는 다르게 단층으로 구성되어 있으며, 그로 인해 보와 기둥의 단면이 약소하게 설계되었다. 중교(라)형의 결과는 〈Table 3〉에 제시된다. 가장 취약한 모드의 평균 발생 수는 접합부 전단파괴가 4.5회, 보의 휨파괴가 2.5회, 기둥의 휨파괴가 5회로 나타났으며, 앞선 유형들과 마찬가지로 보와 기둥의 전단파괴는 나타나지 않았다.

X방향으로는 모든 위치에서 편심이 있었는데, 그 크기는 다른 유형에 비해 작았다. 그럼에도 불구하고 주로 접합부 파괴에 취약한 것으로 나타났다. 7X의 경우 파괴 모드별 강도 사이에 차이가 크지 않아 재료강도의 변화에 따라 순서가 바뀌는 결과를 보였다. 8X와 9X의 경우

편심의 영향으로 인해 V_j 가 가장 작았으며, 재료강도가 변화하여도 파괴의 발생순서는 동일하게 나타났다.

Y방향으로는 외부접합부 형태인 7Y와 9Y에서 가력 방향에 따라 보의 휨파괴 또는 기둥의 휨파괴가 가장 먼저 발생했는데, 이는 보의 상·하부 배근 차이로 인해 거동 방향에 따라 V_{mb} 의 값이 달라진 결과이다. 8Y에서는 해당 기둥의 단면이 다른 기둥보다 약하게 설계되어 기둥이 취약한 것으로 나타났다. Y방향 또한 재료강도가 변화하여도 파괴의 발생순서는 바뀌지 않는 결과를 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 1980년대에 건설된 학교건물을 구성하는 보, 기둥 및 접합부의 강도를 비교함으로써 취약한 구조요소 및 파괴모드를 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 표준설계도의 유형과 재료강도를 변수로 분석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 표준도서의 유형별 분석 결과에 따르면 국교(가)형은 다른 유형들에 비해 접합부에서 편심의 정도가 높은 것이 확인되었으며, 전체 24가지의 검토조건 중 접합부 전단파괴가 평균 11.5회 발생하였다. 중교(나)형 또한 편심의 영향으로 인해 평균 9.5회의 접합부 전단파괴가 발생하였다. 단층건물인 중교(라)형의 경우 그 형태는 다른 유형들의 최상층과 유사했지만, 편심의 크기가 작고 기둥이 낮은 강도로 설계되어 기둥의 휨파괴 발생빈도가 상대적으로 높았다.

2) 수평 지진력이 X방향으로 작용하는 경우 보의 골조 방향 중심과 접합부 중심 간의 편심에 의해 주로 접합부 전단파괴가 발생하였으나, 편심 크기가 작거나 없는 경우에는 보 또는 기둥의 휨파괴가 나타나는 결과를 확인하였다. Y방향으로는 접합부 양쪽 보의 단면크기 또는 상·하부 배근이 다른 경우, 가력 방향에 따라 지배적인 파괴모드가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3) 콘크리트 강도가 증가함에 따라 5가지 파괴모드에 해당하는 강도 값이 모두 증가하는데, 접합부 전단강도의 증가폭이 두드러진다. 이러한 영향으로 V_j 값이 상대적으로 커져, 접합부 강도가 아닌 다른 파괴모드가 지배적인 경우가 많이 발생했다. 철근 강도가 증가하게 되면 보

와 기둥의 강도가 상대적으로 크게 증가하여 V_j 가 가장 작아지게 되는 경우가 우세했다.

4) ASCE 41-13에 따른 V_{jn} 산정 과정에서 γ 값은 일반층의 경우 내부접합부가 외부접합부보다 크게 산정되지만, 최상층의 경우 내부접합부와 외부접합부의 구분 없이 동일한 값을 사용하여 내부접합부가 상대적으로 취약한 결과를 보였다.

본 연구에서는 80년도 학교교사 표준설계도의 유형 및 재료강도의 변화에 따른 구조요소의 기본적인 파괴특성을 살펴보기 위해 기둥의 축력과 조적기움벽체의 구조적인 역할을 고려하지 않았다. 기둥에 축력이 작용하는 경우 접합부와 기둥의 강도가 변화하게 되고, 허리벽이 기둥을 구속할 경우 기둥이 단주효과에 의해 조기 파괴할 수 있으므로 이러한 영향을 고려한 추가적인 연구 수행이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2020년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Korea Meteorological Administration (KMA), "2020 Seismological Annual Report", Retrieved from <https://www.kma.go.kr/communication/webzine/earthquakeyearly.jsp>
2. Korean Educational Development Institute (KEDI), "Measures to Secure Seismic Performance of School Facilities for Student Safety (학생안전을 위한 학교시설의 내진성능 확보방안)", Retrieved from <https://edpolicy.kedi.re.kr/frt/boardView.do?strCurMenuId=10103&nTbBoardArticleSeq=260387>
3. Ministry of the Interior and Safety (MOIS), "MOIS, Announcement of the Results of Promoting Measures for Seismic Retrofitting", Retrieved from <https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/c>
4. Lee, K. S., Wi, J. D., Kim, Y. I., & Lee, H. H., "Seismic Safety Evaluation of Korean R/C School Buildings Built in the 1980s", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.13, No.5, pp.149~159, 2009
5. Lee, S. Y., Kim, K. M., & Yoon, T. H. (2008). Seismic Capacity Evaluation of RC School Structures Using Korean and Japan's Codes. *Proceedings of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Republic of Korea*, Vol.28, No.1, pp.271~274
6. Yi, W. H., "Seismic Performance Evaluation and Retrofit for Existing RC Buildings", *Review of Architecture and Building Science*, Vol.48, No.8, pp.63~75, 2004
7. Lee, S. H., & Jeong, T. K., "A Study on the Estimation of Seismic Capacity and Prediction of Damage Rate for Reinforced Concrete School Structures in Korea", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.22, No.9, pp.67~74, 2006
8. Kang, J., "A Study on the Seismic Retrofit Techniques of School Buildings Constructed in Accordance with Standard Design in 1980s", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.1, pp.1~7, 2012
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "Guidelines for Seismic Evaluation of Existing Buildings (기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령)", MOLIT, 2019
10. Kim, C. G., Eom, T. S., Park, H. G., & Kim, T. W., "Seismic Performance of Lightly Reinforced Concrete Beam-Column Connections for Low-Rise Buildings", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure &*

- Construction, Vol.32, No.3, pp.19~30, 2016
11. American Society of Civil Engineers (ASCE),
“Seismic Evaluation and Retrofit of Existing
Buildings”, ASCE/SEI 41-13, 2014
 12. Park, S. J., & Khalid, M., “Parameters for
shear strength prediction of exterior
beam-column joints without transverse
reinforcement”, Engineering Structures,
Vol.36, pp.198~209, 2012
- Received : July 27, 2021
 - Revised : August 31, 2021
 - Accepted : August 31, 2021