

소규모 철골조 노출형 주각부의 반복가력 실험

임우영^{1*}, 유영찬², 유미나³

Cyclic Loading Test for Exposed Column-base Plate Connections of Small-size Steel Structures

Woo-Young Lim^{1*}, Young-Chan You², Mi-Na Yoo³

Abstract: Cyclic loading tests for a total of nine test specimens were performed to evaluate the seismic performance of the exposed steel column-base plate connections. From the tests, flexural strength, deformation capacity, energy dissipation, and initial stiffness were investigated. The primary test parameters were the thickness of base-plate, embedment length of anchor bolt, the presence of hook, and rib plates. Test results showed that flexural behavior of column base-plate connection was substantially affected by the base-plate thickness, embedment length and the number of anchor bolts. On the other hand, the effect of rib plates on the increase of the flexural performance was not observed. The initial stiffness of the test specimens was about 15% of the flexural stiffness obtained by assuming that the support is fixed. As a result, even if the exposed column base-plate is designed in accordance with current design recommendations, in case that bond strength between concrete and the anchor bolts is not sufficient, the base-plate connection showed an unacceptable load-displacement behavior.

Keywords: Small-size steel structures, Exposed column-base plate connections, Cyclic loading test, Flexural moment, Initial stiffness

1. 서 론

국내 기존 건축물의 약 82%는 내진설계가 적용되지 않은 비내진 건축물로 지진 발생 시 큰 피해가 예상되는 것으로 보고되고 있다(소방방재청, 2011). 이러한 기존 건축물 중 내진 설계 의무대상에서 제외되는 소규모 건축물의 비중은 전체 건축물의 85%를 차지하고 있다(소방방재청, 2011). 여기서, 소규모 건축물은 층수가 2층 이하이고 연면적 500 m² 미만인 건축물을 의미한다(소규모 건축물 구조지침, 2012). 소규모 건축물의 경우, 현행 구조 규칙에서는 별도의 구조계산 없이도 건축물의 최소 안전성을 확보할 수 있도록 최소 요구사항을 제시하고 있다. 하지만, 소규모 건축물의 설계·시공의 영세성으로 인해 구조 전문가들에 의한 면밀한 구조안전성 검토가 제대로 이루어지지 않고 있는 것이 현실이다. 따라서, 이러한 규정만으로는 소규모 건축물이 지진 등과 같은 횡하중

에 대한 구조안전성을 확보하기에 부족한 것으로 여겨지고 있다. 이에, 국내 소규모 건축물의 적절한 구조 안전성을 확보하기 위한 세부 기준을 마련하는 것이 시급한 실정이다.

이 연구에서는 국내 기존 건축물 중 소규모 철골조에 대한 현황조사와 분석을 통해 실제로 현장 시공된 다양한 상세를 가진 노출형 주각부에 대한 구조성능을 평가하고자 한다. 주각부는 기둥과 기초 사이의 접합부를 의미하며, 상부 구조물의 하중을 기초를 통하여 지반에 전달하는 역할을 한다. 특히, 베이스 플레이트는 기초부에서 발생하는 반력을 충분히 지지할 수 있도록 설계되어야 하며, 일반적으로 기둥보다 큰 하중 지지 면적을 가진다.

기존의 노출형 주각부에 대한 많은 연구는 대부분 주각부 설계에 초점을 맞추고 있다(Di Sarno et al., 2007; Drake and Elkin, 1999; Hon and Mechers, 1988; Kanvinde et al., 2012; Lee et al., 2016; Lee and Song, 2008; Melchers, 1992; Thambiratnam and Paramasivam, 1986). 하지만 축하중과 횡하중을 받는 주각부에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 특히, 현황조사를 바탕으로 기존 철골조 건축물에 실제로 시공된 노출형 주각부에 대한 반복가력 실험연구는 국내외적으로 찾기가 힘들다. 따라서, 국내 소규모 철골조 건축물에 적용할 수 있는 개선된 상세를 갖는 주각부를 제시하기 위해서는 기존 소규모 건축물의 현장상세를 갖는 주각부에 대한 연구가 필요하다.

¹정회원, 원광대학교 건축공학과 조교수, 교신저자

²정회원, 한국건설기술연구원 건축도시연구소 선임연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 건축도시연구소 박사후연구원

*Corresponding author: wyarchi@nate.com

Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk, 54538, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 연구에서는 기존 소규모 철골조에서 나타나는 현장상세 노출형 주각부와 이를 보완한 상세를 가진 주각부에 대한 반복가력 실험을 통해 다양한 상세를 가진 노출형 주각부의 구조성능을 평가하고자 한다.

2. 현행 철골조 노출형 주각부 설계기준

소규모 건축물 구조지침(2012)에 따르면, 강제기둥의 주각부는 모멘트를 기초에 전달하는 고정주각으로 설계하여야 한다고 규정되어 있다. 주각부 베이스 플레이트의 크기는 앵커볼트의 위치를 고려하여 기둥형상의 각 방향 폭보다 150 mm 이상 크게 하고, 두께는 2층 건물의 경우는 30 mm 이상, 1층 건물의 경우는 20 mm 이상을 적용한다. 앵커볼트의 크기와 개수는 2층 건물의 경우 직경 22 mm 이상의 앵커볼트를 6개 이상 사용하고, 1층 건물의 경우 직경 20 mm 이상의 앵커볼트를 6개 이상 사용한다. 앵커볼트의 정착은 기초의 하부까지 직경의 30배 이상 연장되어 후크형태로 기초에 정착하여야 한다.

국내 강구조 설계기준(2014)에 따르면, 주각부는 기둥의 하중과 모멘트를 기초에 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 콘크리트 단면의 일부분이 지압을 받는 경우, 콘크리트 압괴의 한계상태에 대하여 다음과 같이 산정한다.

$$P_p = 0.85f_{ck}A_1 \sqrt{A_2/A_1} \leq 1.7f_{ck}A_1 \quad (1)$$

여기서, A_1 은 베이스 플레이트의 면적이고 A_2 는 베이스 플레이트와 닮은꼴의 콘크리트 지지부분의 최대면적이다.

강구조 설계기준에서 제시하고 있는 허용응력설계법에서는 주각부를 고정으로 설계하는 경우 콘크리트 기초부 윗면에서의 응력분포를 Fig. 1과 같이 3가지로 구분하고 있다. Fig. 1(a)는 편심길이(e)가 $D/6$ 이하인 경우로서 ($e \leq D/6$), 이 경우

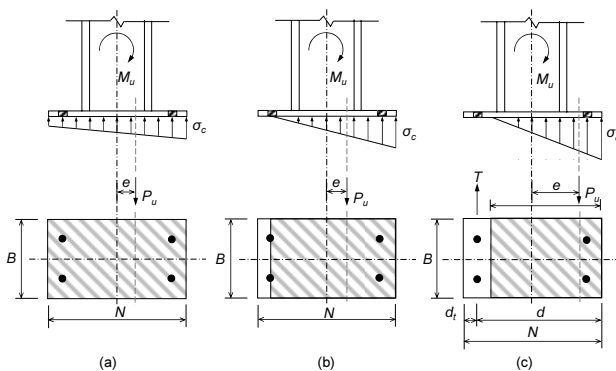


Fig. 1 Stress distribution on the concrete foundation

앵커볼트에 인장력이 발생하지 않는다. 이 때, 콘크리트 기초부에서 발생하는 콘크리트 지압응력은 $\sigma_c = [N(1+6e/D)]/bD$ 이며, $e = M/N$ 이다. Fig. 1(b)는 편심길이가 $D/6$ 를 초과하고 $D/6+d/3$ 이하인 경우로서 ($D/6 < e \leq D/6+d/3$), 베이스 플레이트면 일부에 압축력이 발생하지 않으나, 앵커볼트에 인장력이 발생하지 않는 경우이다. 콘크리트 지압응력은 $\sigma_c = 2N/[3b(D/2-e)]$ 이다. Fig. 1(c)는 편심길이가 $D/6+d/3$ 미만인 경우이며 ($D/6+d/3 < e$), 이때 앵커볼트에는 인장력이 발생한다. 이때 기초 콘크리트에서 발생하는 최대 압축응력은 $\sigma_c = [2N(e+D/2-d_t)]/[bx_n(D-d_t-x_n/3)]$ 이다. 여기서, M 은 휨모멘트, N 은 축력, D 는 베이스 플레이트의 폭, d_t 는 인장을 받는 앵커볼트에서 베이스 플레이트 연단까지의 거리, x_n 는 중립축 거리이다.

앵커볼트는 주각부의 베이스 플레이트를 통해 전달되는 인장 및 전단하중에 대해 저항할 수 있도록 설계해야 하며, 콘크리트내 정착 규정은 콘크리트구조기준을 따라야 한다. 강구조 설계기준에 의하면, 앵커볼트는 기초 콘크리트로부터 뽑히지 않도록 다음 식 (2)와 같이 정착길이(l_d)를 확보해야 한다.

$$l_d \geq \frac{f_t}{4u_c} d_b \quad (2)$$

여기서, d_b 는 앵커볼트의 지름, u_c 는 앵커볼트와 콘크리트 사이의 부착강도, f_t 는 앵커볼트의 인장강도이다.

Fig. 2는 베이스 플레이트의 설계변수를 보여준다. AISC (2005)에서는 베이스 플레이트의 두께를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$t_{\min} = l \sqrt{\frac{2P_u}{0.9F_yBD}} \quad (\text{LRFD}) \quad (3)$$

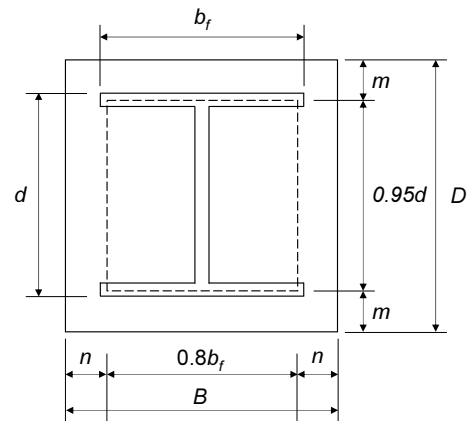


Fig. 2 Base-plate design variables

$$t_{\min} = l \sqrt{\frac{3.33P_u}{F_y B D}} \quad (\text{ASD}) \quad (4)$$

여기서, F_y 는 강재 기둥의 설계항복강도이다. l 은 베이스 플레이트의 돌출길이 m 과 n , 그리고 축력이 작용하는 유효 H단면의 돌출길이 λ'_n 중에서 가장 큰 값을 정한다. 여기서, $m = (D - 0.95d)/2$, $n = (B - 0.8b_f)/2$ 이다. AISC (2005)에서 제시하고 있는 축력이 작용하는 유효 H단면의 돌출길이 λ'_n 은 다음 식 (5)로 구한다.

$$\lambda'_n = \left(\frac{2\sqrt{X}}{1 + \sqrt{1-X}} \right) \sqrt{db_f/4} \quad (5)$$

여기서, $X = 4db_f P_u / (d + b_f)^2 \phi_B P_p$ 이고, ϕ_B 는 0.6이다.

식 (3)과 (4)를 사용하여 구한 베이스 플레이트의 최소 두께는 DF1과 SBC 계열 실험체의 경우, 14.1 mm(LRFD), 17.3 mm(ASD)이고, DF2의 경우, 12.2 mm(LRFD), 14.9 mm(ASD), DF3 실험체의 경우, 13.9 mm(LRFD), 17.0 mm(ASD)이다. AISC(2005)에서 제시하고 있는 베이스 플레이트의 최소 두께는 허용응력 설계법(ASD)으로 구한 값이 한계상태 설계법(LRFD)으로 구한 값보다 약 22.4% 정도 큰 값을 나타냈다. 베이스 플레이트 두께 계산을 위해 재료시험으로부터 구한 강재의 항복강도($F_y = 250 \text{ MPa}$)를 사용하였다.

3. 소규모 철골조 현황조사

본 연구에서 주각부 현황조사는 기존 철골조 건축물 중 구조상세에 대한 검토가 가능한 66건의 도면을 대상으로 수행되었다. Fig. 3은 국내 소규모 철골조 건축물의 전형적인 주각부 상세를 보여준다. 현황 조사 결과는 구조안전성에 대한 검토없이 다양한 방법으로 주각부가 현장시공되고 있음을 보여준다. Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같이 앵커볼트가 강재 기둥 플랜지 사이에 위치하는 경우가 다수 확인되었다. 현행 기준에 따르면, 앵커볼트는 베이스 플레이트 모서리 부분에 설치되어야 한다. 앵커볼트는 일반적으로 4개가 사용되었으며, 베이스 플레이트의 두께에 따라 리브플레이트가 있는 경우와 없는 경우 모두 실제 시공되고 있었다(Fig. 3(a), (b), (c) 참조). 참고로, 리브플레이트 설치여부에 대한 기준은 제시되어 있지 않다. 베이스 플레이트의 경우, 현행 기준에서는 기둥 단면의 크기보다 큰 베이스 플레이트를 사용하도록 규정되어 있지만, 실제 시공현장에서는 기둥과 같은 크기의 베이스 플레이트를 사용하거나 얇은 두께의 베이스 플레이트 사용하는 것으로 나타났다(Fig. 3(e), (f) 참조). 앵커볼트의 길이는 현행

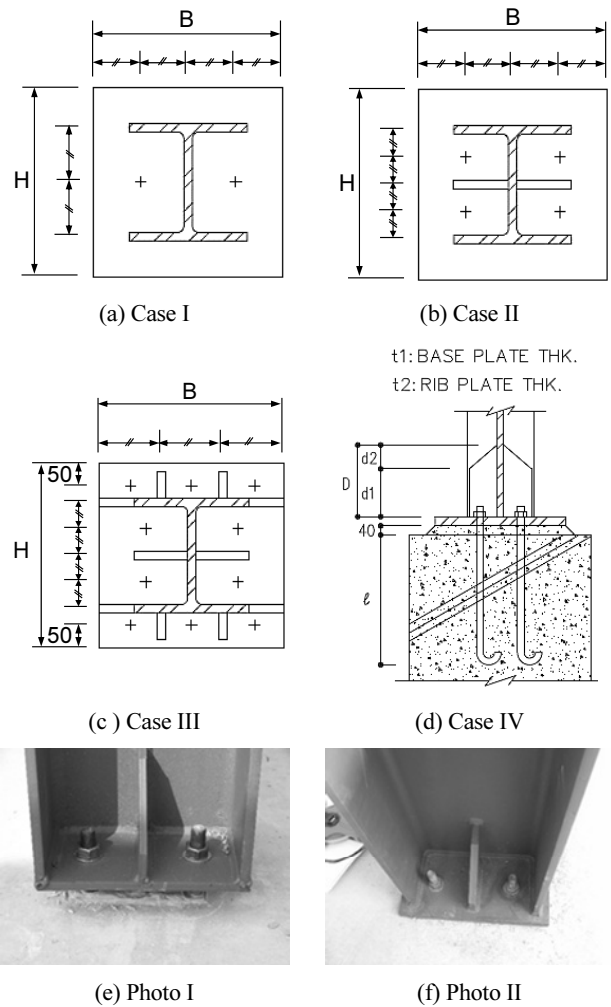


Fig. 3 Investigation of exposed steel column base plate connection in existing small-scaled steel structures

콘크리트 구조기준(KCI, 2012)에 따라 결정되어야 하나, 대부분의 경우 앵커볼트 길이에 대한 관련 근거가 제시되어 있지 않았다. 도면검토 결과, 앵커볼트의 매립깊이는 약 500 mm 정도로 파악되었다(Fig. 3(d) 참조). 게다가, 일부 주각부에는 원형 강봉을 앵커볼트로 사용한 것으로 나타났다. 한편, 현장조사된 주각부 상세는 지점에서의 고정조건을 확보하기 어려운 상세이며, 이러한 경계조건이 보-기둥 접합부와 조합되면 구조물이 불안정한 구조가 될 수 있어 주각부의 성능에 대한 검토가 필요하다.

4. 실험 프로그램

4.1 실험체 상세

주각부는 소규모 건축물 구조지침(2012)과 AISC 설계기준

(2005)에 의해 설계되었으며, H형 단면을 가진 강재 기둥(SS400, $F_y = 235$ MPa)은 소규모 건축물 구조지침(5장 강구조)에서 제시하고 있는 표준단면치수를 사용하였다. 소규모 건축물 구조지침(2012)에는 기둥 부재로 사용할 수 있는 총 6가지의 철골부재가 제시되어 있으며, 건물의 층수(2층 이하)와 경간(6 m 이하, 6m 초과 8 m 이하)에 따라 부재의 사용을 일부 제한하고 있다. 소규모 건축물 구조지침에 제시되어 있는 이러한 철골부재를 건물의 층수와 경간에 따라 사용할 경우 별도의 구조계산 없이 구조물의 최소 안전성을 보장할 수 있다.

본 연구에서는 소규모 건축물 구조지침에서 제시하고 있는 철골부재 중 크기가 H-300×300×10×15 mm인 H형 단면을 가진 강재기둥을 사용하였으며, 주각부의 휨성능을 조사하기 위해 길이는 1,000 mm로 정하였다. 앵커볼트의 지름은 22 mm 이고 SM45C 강종($F_u = 700$ MPa)이 사용되었다. 여기서, F_u 는 설계인장강도이다. 콘크리트 기초의 평면 크기는 800×800 mm이고 높이는 775 mm이다. 이때, 기초에 사용된 콘크리트의 설계압축강도는 24 MPa이다. 이때, 베이스 플레이트와 기초부 콘크리트 사이 모르타르 채움은 수행되지 않았다. 모든 실험체에 모르타르 채움을 하지 않은 이유는 현행 소규모 건축물 구조지침(2012)에는 베이스 플레이트와 기초부 콘크리트 사이 모르타르 채움에 대한 명확한 기준이 제시되어 있지 않기 때문이다.

Fig. 4은 실험체 상세를 보여준다. 실험체 주요 변수는 베이스

스 플레이트의 두께, 앵커볼트의 개수와 매립깊이, 앵커볼트 후크의 유무, 그리고 리브 플레이트(Rib plates)의 유무이다. 실험체 상세는 Table 1에 요약되어 있다.

DF1, DF2, DF3 실험체는 실제 현장에서 시공된 결합상세를 가진 노출형 주각부 실험체이다. DF1과 DF2 실험체의 베이스 플레이트의 크기는 400×400 mm이고 두께는 20 mm이다. 4개의 앵커볼트가 강재 기둥 플랜지 사이에 설치되었고, 앵커볼트의 매립깊이는 500 mm, 후크길이는 264 mm이다. 여기서, 앵커볼트의 매립깊이(= 500 mm)는 소규모 철골조건

Table 1 Properties of test specimens

Specimens	Base plate			Anchor bolt		No. of rib plates
	Dimension (mm)	Thickness (mm)	No. (EA)	Embedment length (mm)	Hook length (mm)	
DF1	450×450	20	4	500	264	-
DF2	400×400	20	4	500	264	2
DF3	350×350	22	4	500	0	2
SBC1	450×450	25	6	650	264	-
SBC2	450×450	25	6	650	264	2
SBC3	450×450	30	6	650	264	-
SBC4	450×450	25	6	176	264	-
SBC5	450×450	25	4	650	264	-
SBC6	450×450	25	4	650	264	2

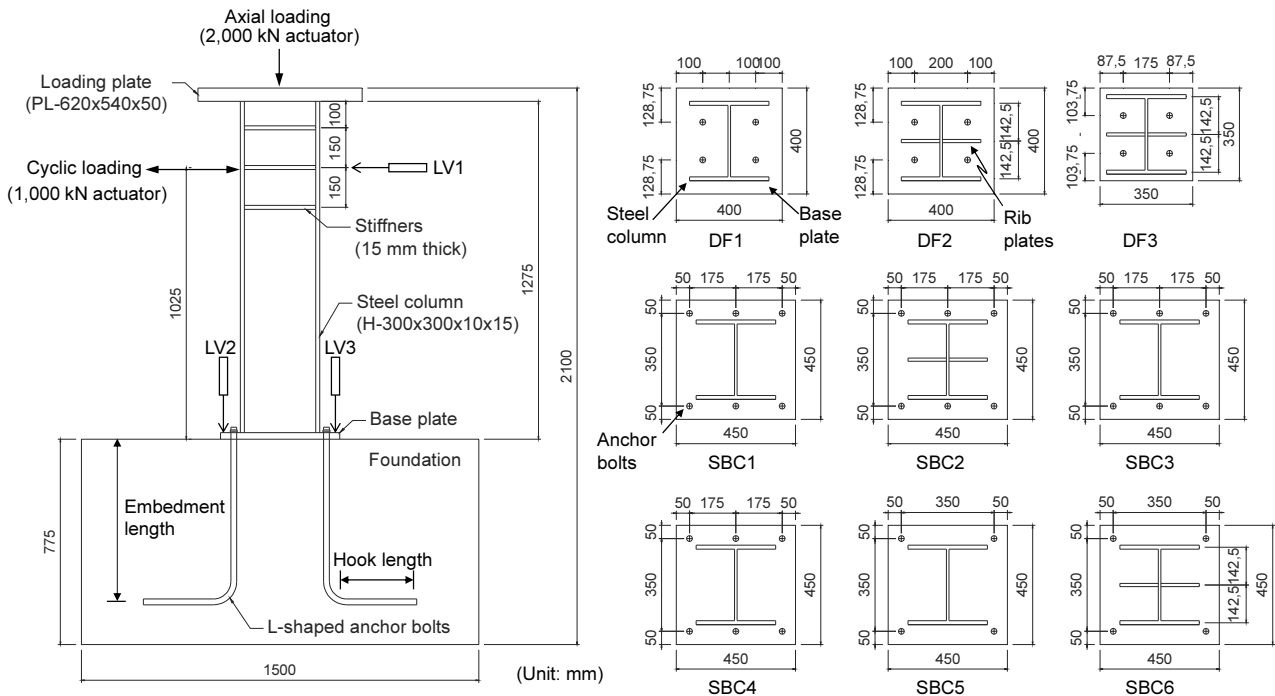


Fig. 4 Details of test specimens

축물 현황조사에서 얻은 자료의 평균값을 나타내며, 후크의 길이는 콘크리트 구조기준(2012)에 의해 산정되었다. 이 연구에서는 표준갈고리의 정착을 위한 갈고리철근으로 90° 표준갈고리가 사용되었다. 콘크리트 구조기준(2012)에 의하면, 90° 표준갈고리의 경우, 철근을 구부린 끝에서 $12d_b$ 이상 연장하여야 한다. 따라서, 모든 실험체의 표준갈고리 길이는 264 mm로 산정하였다. DF1 실험체는 리브플레이트가 설치되지 않았고, DF2 실험체는 강재 기둥 웹 부분에 2개의 리브플레이트가 설치되었다. DF3 실험체는 DF1과 DF2 실험체와는 달리 베이스 플레이트의 크기가 350×350 mm이고 두께는 22 mm이다. 4개의 앵커볼트의 매립깊이는 500 mm이고 2개의 리브플레이트가 DF1, DF2 실험체와 동일한 위치에 설치되었다. 그러나 DF3 실험체의 앵커볼트에는 후크가 설치되지 않았다.

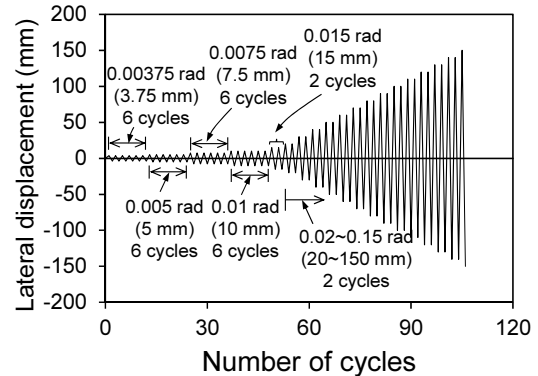
SBC1~SBC6 실험체는 노출형 주각부 내진성능을 알아보기 위해 다양한 변수를 가지고 있는 실험체이다. 모든 실험체의 베이스 플레이트 크기는 450×450 mm로 동일하며, 강종은 SS400이 사용되었다. SBC3 실험체를 제외한 실험체의 경우, 베이스 플레이트의 두께는 25 mm이다. 반면에, SBC3 베이스 플레이트의 두께는 30 mm이다. SBC1~SBC4 실험체는 모두 6개의 앵커볼트가, SBC5와 SBC6 실험체는 4개의 앵커볼트가 사용되었으며, DF1~DF3 실험체와는 달리, 앵커볼트는 강재 기둥 외부에 설치되었다. 여기서, SBC5와 SBC6 실험체에 4개의 앵커볼트를 사용한 것은 6개의 앵커볼트가 설치된 실험체(SBC1과 SBC2)와 앵커볼트 개수에 따른 주각부의 구조 성능을 상호비교하기 위함이다. SBC4 실험체를 제외한 모든 실험체의 경우, 앵커볼트의 매립깊이는 650 mm이며, 후크의 길이는 264 mm이다. 여기서, 앵커볼트의 매립깊이(= $30d_b \approx 650$ mm)는 소규모 건축물 구조지침(2012)에 의해 산정되었다. SBC4 실험체의 경우, 앵커볼트의 매립깊이는 콘크리트 구조기준에 의해 산정되었다. 콘크리트 구조기준(2012)에 의하면, 표준갈고리를 갖는 이형철근의 정착길이는 항상 $8d_b$ 이상 또는 150 mm 이상이어야 한다(Section 8.2.5). 비록 이 연구에서는 기초부 정착을 위해 이형철근 대신 원형강봉이 사용되었지만, 소규모 철골조 주각부가 상대적으로 낮은 기초위에 시공되는 점을 감안하여 앵커볼트의 매립깊이를 176 mm로 산정하였다. 리브플레이트의 영향을 알아보기 위해 SBC2와 SBC6 실험체에는 강재기둥 웹 중앙부에 플랜지 두께와 동일한 두께를 가진 2개의 리브플레이트가 설치되었다.

4.2 실험체 셋업 및 계측계획

Fig. 5(a)는 노출형 주각부 실험체 셋업을 보여준다. 실험체는 1000 kN 액츄에이터를 사용하여 변위제어 방식으로 반복 가력하였다. 하중 스케줄은 Fig. 5(b)에서 보이는 바와 같이,



(a) Test setup



(b) Loading schedule

Fig. 5 Test setup and loading schedule

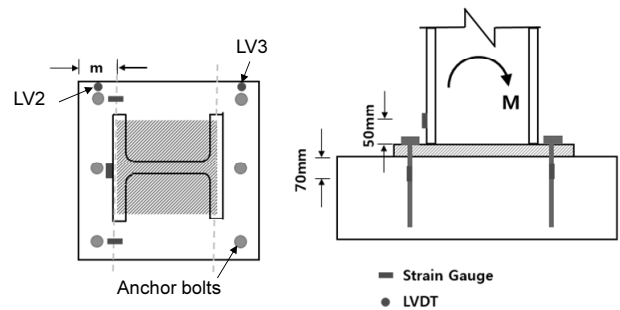


Fig. 6 Measurement of strain and displacement

AISC(2010)에서 제시하고 있는 가력이력이 사용되었다. 첫 번째 스텝(6 cycles)은 0.00375 rad(3.75 mm), 두 번째 스텝(6 cycles)은 0.005 rad(5 mm), 세 번째 스텝(6 cycles)은 0.0075 rad(7.5 mm), 네 번째 스텝(4 cycles)은 0.01 rad(10 mm), 다섯 번째 스텝(2 cycles)은 0.015 rad(15 mm), 여섯 번째 스텝(2 cycles)은 0.02 rad(20 mm), 그리고 일곱 번째 스텝(2 cycles)부

터는 0.01 rad씩 증가시키며 반복가력하였다. 강제 기둥 상부에는 2000 kN 용량의 동적 액추에이터를 사용해 $0.15F_y A_g (= 413 \text{ kN})$ 크기의 축력이 재하되었다.

변형률은 스트레인 게이지를 사용하여 측정되었다. 스트레인 게이지는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 베이스 플레이트 위 횡단면부터 끝단까지의 거리인 m 에 해당되는 거리에, 앵커볼트에는 기초면에서 70 mm 떨어진 곳에, 강제 기둥에는 베이스 플레이트 상부로부터 50 mm 떨어진 곳에 스트레인 게이지가 부착되었다. 변위는 총 3개의 LVDT를 사용하여 측정되었다. LV1은 실험체의 횡변위 측정을 위해 설치되었고, LV2와 LV3는 베이스 플레이트의 상부 들뜸을 측정하기 위해 설치되었다.

4.3 사용재료

Table 2는 베이스 플레이트, 강제 기둥의 웹 및 플랜지, 앵커볼트의 재료시험 결과를 보여주고 있다. 강재의 인장시험은 KS B 0801(2007), KS B 0802(2003)에 의해 수행되었다. 베이스플레이트에 사용된 SS400 강종의 항복강도(F_y)와 인장강도(F_u)는 각각 250.0, 422.9 MPa로 측정되었으며 탄성계수(E_s)는 196.1 GPa로 측정되었다. 강제 기둥의 플랜지와 웹의 강종은 SS400으로 항복강도는 각각 329.0와 332.2 MPa, 인장강도는 476.4와 498.2 MPa이며 탄성계수는 각각 203.8와

206.2 GPa로 측정되었다. 앵커볼트(SM45C)의 경우, 항복강도(f_y)와 인장강도(f_u)는 각각 608.7, 757.2 MPa이었으며, 탄성계수는 201.6 GPa이었다.

5. 실험결과

5.1 실험체 손상 및 파괴모드

AISC(1997)에 의하면, 노출형 철골 주각부의 파괴모드는 베이스 플레이트 압축면 및 인장면의 항복, 앵커볼트의 인장 항복, 앵커볼트 전단파괴, 앵커볼트 뽑힘, 콘크리트 기초 지지 파괴, 그리고 강제 기둥의 항복 등으로 구분할 수 있다.

Fig. 7은 전형적인 노출형 주각부 실험체의 손상 및 파괴모드를 보여준다. DF1, DF2, 그리고 DF3 실험체의 경우, 베이스 플레이트와 앵커볼트 사이에 이격이 발생한 후 베이스 플레이트가 항복하였으며, 최종적으로 앵커볼트의 항복이 발생하였다. 각 실험체의 베이스 플레이트의 항복은 층간변위 0.45%, 0.33%, 그리고 0.7%에서 발생하였으며, 앵커볼트의 항복은 DF1과 DF2 실험체의 경우, 각각 층간변위 약 3.89%, 3.43%에서 발생하였다. 이때, DF3 실험체의 앵커볼트는 항복하지 않은 것으로 나타났다. SBC1과 SBC2 실험체의 경우, 층간변위 약 0.6% 내외에서 베이스 플레이트와 앵커볼트 사이에 이격이 발생하였으며, 1.99%에서 베이스 플레이트 항복 후 층간변위 약 3%에서 앵커볼트가 항복하였다. 반면에, SBC3 실험체는 약 0.56% 내외에서 앵커볼트 이격이 발생하였으며, 앵커볼트의 항복이 층간변위 약 2.4%에서 발생한 후 베이스 플레이트가 항복(2.83%)하는 것으로 나타났다. SBC4 실험체의 경우, 층간변위 약 0.57%에서 베이스 플레이트와 앵커볼트가 사이의 이격이 발생한 후 앵커볼트의 뽑힘에 의한 파괴가 발생하였다. 이때 앵커볼트는 항복하지 않았다. SBC5 실험체의 경우, 층간변위 0.67%에서 앵커볼트 이격이 발생했으며, 베이스 플레이트의 항복(2.83%)이 앵커볼트의 항복(3.31%)보다 선행되었다. SBC6 실험체는 앵커볼트의 이격이 0.75%에서 시작되었으며, 약 2.59%에서 항복하였다. 베이스 플레이트의 항복은 약 5%에서 발생하는 것으로 나타났다.

실험결과, 모든 실험체는 매우 작은 층간변위에서 베이스 플레이트와 앵커볼트 사이의 이격이 발생하는 것으로 나타났다. 실험변수와 관계없이 층간변위 0.33~0.76%에서 이격이 발생하였으며, 이는 앵커볼트와 콘크리트 사이의 부착력이 충분하지 않고, 매립길이가 길어서 앵커 항복으로 인한 영구 변형이 크게 발생한 것으로 판단된다. 아울러, 돌출된 앵커볼트의 나사산에 대한 기준이 현재 마련되어 있지 않은 관계로 공장제작된 나사산의 하중저항능력이 충분하지 않았기 때문

Table 2 Material properties

Members	Grade	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation (%)
Base plate	SS400	250.0	422.9	196.1	35.4
Steel column	Flange	329.0	476.4	203.8	32.0
		Web	332.2	498.2	206.2
Anchor bolt	SM45C	608.7	757.2	201.6	10.8

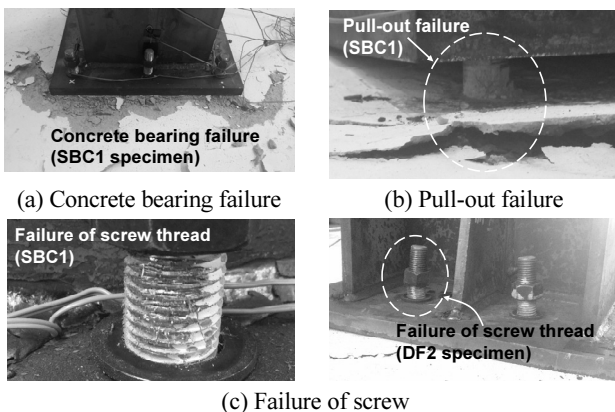


Fig. 7 Typical damage and failure mode of exposed steel base plate connections

에 앵커볼트 나사산의 변형으로 인한 이격이 가력 초기에 발생한 것으로 판단된다. 베이스 플레이트의 두께가 20~25 mm 인 경우에는 베이스 플레이트의 항복이 앵커볼트의 항복보다 먼저 발생하는 것으로 나타났으며, 두께가 30 mm인 경우 (SBC3), 앵커볼트의 항복이 베이스 플레이트의 항복보다 선행되는 것으로 나타났다. 현장상세를 가진 실험체(DF1, DF2, DF3)의 경우, 베이스 플레이트와 앵커볼트 사이의 이격은 층간변위 0.33~0.7% 사이에서 발생하였으며, 베이스 플레이트의 항복은 1.44~1.93%, 그리고 앵커볼트의 항복은 2.99~3.89% 에서 발생하는 것으로 나타났다. 앵커볼트의 길이가 구조기준에 의해 결정된 경우, 앵커볼트의 항복은 2.79~3.94% 사이에서 발생하는 것으로 나타났다.

5.2 모멘트-층간변위 관계

Fig. 8은 실험체별 모멘트-층간변위 관계를 보여준다. Fig. 8에서 강제기둥의 설계항복강도($F_y = 235 \text{ MPa}$)를 적용한 강축방향 소성모멘트($M_p = F_y Z$)는 319.6 kN·m이다. 여기서, Z는

기둥 단면의 단면계수이며, 실험에 사용된 강제기둥의 강축방향 단면계수는 $1360 \times 10^3 \text{ mm}^3$ 이다. 이 연구에서는 항복점을 평가하기 위해 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 원점과 최대하중의 75%에 해당하는 점을 연결한 직선과 최대하중에서의 수평

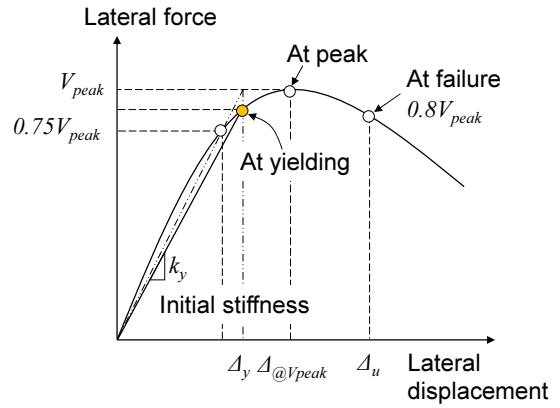


Fig. 9 Definition of yielding point and initial stiffness

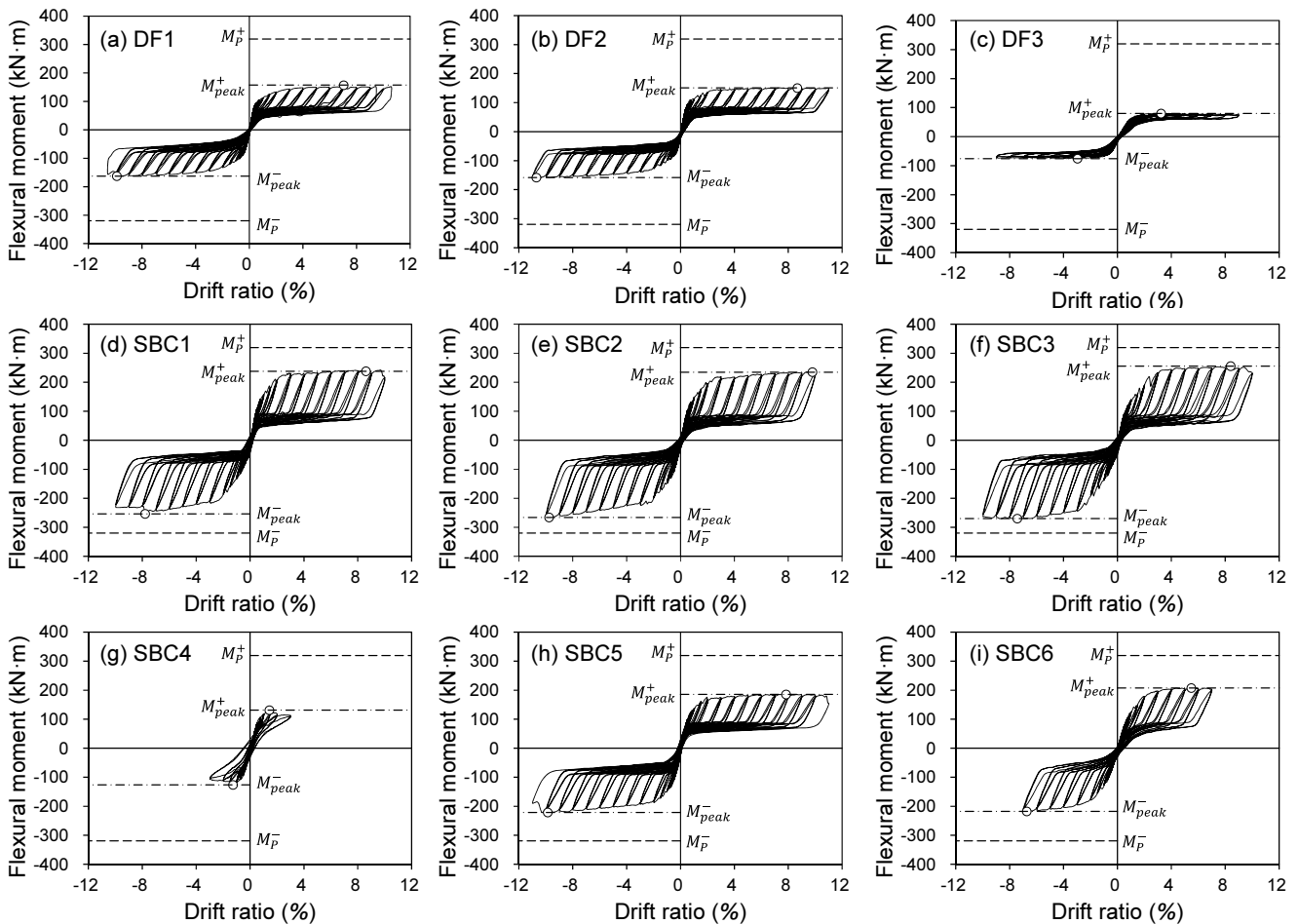


Fig. 8 Flexural moment-drift ratio relationship

선이 만나는 점에서의 수직선이 실험체의 모멘트-곡률 곡선과 만나는 점을 항복점으로 정의하였다(Lim et al., 2016).

Fig. 8(a), (b), (c)는 현장상세를 가진 DF1, DF2, 그리고 DF3 실험체의 모멘트-층간변위 관계를 보여준다. 앵커볼트에 후크를 설치한 DF1과 DF2 실험체는 리브플레이트의 유무와는 상관없이 유사한 거동을 보여주었다. 반면에, 앵커볼트에 후크가 설치되지 않은 DF3 실험체의 경우, 앵커볼트와 기초부 사이에서 발생한 미끄러짐으로 인해 DF1과 DF2 실험체와는 아주 상이한 거동을 보여주었다. 세 실험체의 모멘트 강도비 (M/M_p)는 각각 0.49, 0.48, 0.24를 나타냈다. H형 강재 기둥의 플랜지 사이에 앵커볼트가 설치되는 경우, 주각부의 휨저항 능력은 강재기둥 소성모멘트의 50% 이하를 나타냈으며, 앵커볼트에 후크가 설치되지 않을 경우, 그 값은 약 24%정도를 나타냈다.

실험결과, 모든 실험체는 앵커볼트와 베이스 플레이트 사이에 이격이 발생하면서 미끄러짐 현상이 시작되었다. 이후 앵커볼트와 기초부 콘크리트 사이의 부착력이 완전히 상실되고 난 뒤 앵커볼트의 뺏힘현상이 발생하는 것으로 나타났다.

이러한 실험결과 및 현상을 종합해 보면, 노출형 주각부의 거동은 앵커볼트 매립깊이의 영향이 큰 것으로 나타났다. 즉, 앵커볼트의 매립깊이가 구조기준을 만족하는 경우, 휨강도가 현장상세 실험체보다 증가하는 것으로 나타났지만, 매립깊이가 현저히 작은 경우, 휨강도는 현장상세 실험체에 비해 매우 작은 값을 나타냈다(Fig. 8(g) 참조). 매립깊이가 176 mm인 SBC 4 실험체의 강도는 소성모멘트의 40% 수준이었다($M/M_p = 0.4$). 더욱이, 앵커볼트의 매립깊이가 구조기준을 만족한다고

할지라도 앵커볼트와 콘크리트 사이의 부착력이 충분히 확보되지 않는다면 슬립형 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

앵커볼트의 개수가 6개인 실험체(SBC1, SBC2, 그리고 SBC3)는 강도비가 0.77~0.82였으며, 4개인 경우(SBC5와 SBC6)에는 0.64~0.67 수준으로 나타났다.

5.3 초기강성

노출형 주각부 접합부의 초기강성(k_y)은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 하중-변위 곡선에서 항복 시 하중을 그 때의 변위로 나눈 값($= V_y/\Delta_y$)으로 정의하였다.

NZS 3404(2009)에서는 주각부가 구속되었을 때 휨강성 하한값을 식 (6)과 같이, 핀접합되었을 때 휨강성의 상한값을 식 (7)과 같이 제시하고 있다.

$$k_{fx} = \frac{1.67EI_c}{L_c} \quad (6)$$

$$k_{pm} = \frac{0.1EI_c}{L_c} \quad (7)$$

여기서, k_{fx} 와 k_{pm} 는 각각 주각부 지점조건을 고정접합(fixed)과 핀접합(pinned)으로 가정했을 때의 회전강성(kN·m/radian)을 의미하며, E 는 탄성계수(205,000 MPa), I_c 는 강재기둥 단면의 강축방향 단면 2차모멘트, 그리고 L_c 는 기둥의 높이이다.

실험결과에서 얻은 각 실험체의 초기강성은 Table 3에 정

Table 3 Summary of test results

Specimens	At yielding								At peak				$\frac{M_{peak}}{M_p}$		$\frac{k_y}{k_{fx}}$ (kN·m/rad)		$\frac{k_y}{k_{pn}}$ (kN·m/rad)	
	Positive (+)				Negative (-)				Positive (+)		Negative (-)							
	Δ_y^+ (mm)	Drift ratio (%)	M_y^+ (kN·m)	Δ_y^- (mm)	Drift ratio (%)	M_y^- (kN·m)	$\Delta_{@Mpeak}^+$ (mm)	Drift ratio (%)	M_{peak}^+ (kN·m)	$\Delta_{@Mpeak}^-$ (mm)	Drift ratio (%)	M_{peak}^- (kN·m)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
DF1	18.5	1.85	121.8	-19.9	-1.99	-129.5	68.9	6.89	157.5	-101.5	-10.15	-162.9	0.49	0.51	0.10	0.10	1.71	1.69
DF2	12.8	1.28	124.8	-19.5	-1.95	-123.5	83.8	8.38	150.6	-110.4	-11.04	-158.7	0.47	0.50	0.15	0.10	2.53	1.64
DF3	13.8	1.38	69.4	-8.6	-0.86	-58.2	31.7	3.17	80.3	-30.2	-3.02	-75.9	0.25	0.24	0.08	0.11	1.30	1.76
SBC1	18.8	1.88	210.7	-28.4	-2.84	-214.3	82.8	8.28	237.8	-73.5	-7.35	-253.5	0.74	0.79	0.17	0.12	2.91	1.96
SBC2	19.0	1.90	199.3	-27.6	-2.76	-220.5	94.3	9.43	234.8	-98.6	-9.86	-265.7	0.73	0.83	0.16	0.12	2.72	2.07
SBC3	27.0	2.70	224.3	-29.7	-2.97	-236.4	81.1	8.11	255.2	-74.6	-7.46	-270.0	0.80	0.84	0.13	0.12	2.16	2.07
SBC4	7.7	0.77	101.4	-7.7	-0.77	-106.7	13.4	1.34	131.3	-12.5	-1.25	-126.4	0.41	0.40	0.20	0.22	3.42	3.60
SBC5	15.7	1.57	157.7	-18.5	-1.85	-183.6	75.5	7.55	185.5	-100.0	-10.00	-221.2	0.58	0.69	0.16	0.15	2.61	2.58
SBC6	20.2	2.02	175.5	-19.9	-1.99	-177.2	52.6	5.26	207.5	-67.3	-6.73	-217.7	0.65	0.68	0.13	0.14	2.25	2.31

Note: M_p is the plastic moment of steel column section ($= 319.6$ kN·m); k_y is the initial stiffness obtained from the test results ($= V_y/\Delta_y$) where V_y and Δ_y are the lateral force and displacement at yielding, respectively. The value of k_{fx} and k_{pn} is the flexural stiffness obtained from the Eqs. (6) and (7), respectively.

리된 것과 같이 현행 기준에서 제시하고 있는 편접합일 때 휨강성의 최대값보다 크고 구속되었을 때 휨강성의 하한값보다는 작은 값을 나타냈다. 주각부가 구속되었을 때의 휨강성 하한값에 대한 실험값의 비(k_y/k_{fx})는 정가력일 때 0.08~0.20을, 부가력일 때 0.10~0.22로 나타났으며, 편접합되었을 때 강성의 상한값에 대한 실험값의 비(k_y/k_{pn})는 정가력일 때 1.30~3.42, 부가력일 때 1.64~3.60으로 나타났다. DF 계열 실험체의 초기 강성은 고정접합일 때 휨강성의 약 10% 수준이었으며, SBC 계열 실험체의 경우, 약 15% 수준으로 나타났다. 반면에, DF와 SBC 계열 실험체의 초기강성은 편접합일 때 휨강성의 상한값에 대해, 최대 85%와 168% 정도 더 큰 값을 나타냈다.

5.4 에너지 소산능력

Fig. 10은 목표변위별 에너지 소산능력을 나타낸다. 에너지 소산능력은 모멘트-층간변위 곡선에서 목표 층간변위별 마지막 사이클의 내부 면적으로 구했다(ACI T1.1-01, 2001).

실험결과, 베이스 플레이트의 두께와 앵커볼트의 개수, 그리고 앵커볼트의 매립깊이가 에너지 소산능력에 영향을 끼치는

것으로 나타났다. SBC 계열의 에너지 소산능력은 대체로 DF 계열보다 큰 값을 나타냈다. 베이스 플레이트의 두께(=30 mm)가 가장 큰 SBC3 실험체의 에너지 소산능력이 가장 큰 것으로 나타났으며, 앵커볼트의 개수가 6개인 실험체의 에너지 소산능력이 4개인 실험체보다 다소 크게 나타났다. 초기 탄성구간에서는 모든 실험체의 에너지 소산능력이 유사하게 나타났다.

5.5 변형률

주요 실험 변수인 베이스 플레이트의 두께와 앵커볼트의 개수가 주각부 내진성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 베이스 플레이트에서 측정된 변형률을 분석하였다. Fig. 11은 베이스 플레이트에서 측정된 변형률 변화를 보여준다. 비교를 위해 DF1, SBC3, SBC5 실험체를 사용하였다. 앞서 언급한 바와 같이, DF1, SBC3, 그리고 SBC5 실험체는 각각 20, 30, 25 mm 두께의 베이스 플레이트가 사용되었다. DF1와 SBC5 실험체의 경우, 4개의 앵커볼트가 사용되었으며, SBC3 실험체에는 6개의 앵커볼트가 설치되었다.

베이스 플레이트의 두께가 20 mm인 DF1 실험체의 경우, 베이스 플레이트는 층간변위 4.48%에서 항복하는 것으로 나타났으며, 두께가 25 mm인 SBC5 실험체는 3.76%에서 항복하였다. 반면에, 두께가 30 mm인 SBC3 실험체의 경우, 베이스 플레이트는 실험 종료 시까지 탄성상태에 있는 것으로 나타났다. 아울러, 두께가 20, 25 mm인 경우, 베이스 플레이트는 압축면에서 항복하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앵커볼트가 실험초기에 뽑혀져 나와 기초부와 베이스 플레이트 사이에 이격이 발생하면서 플레이트 돌출길이 부분에 기초부에서 발생하는 반력에 의해 압축 변형이 선행되었기 때문으로 판단된다.

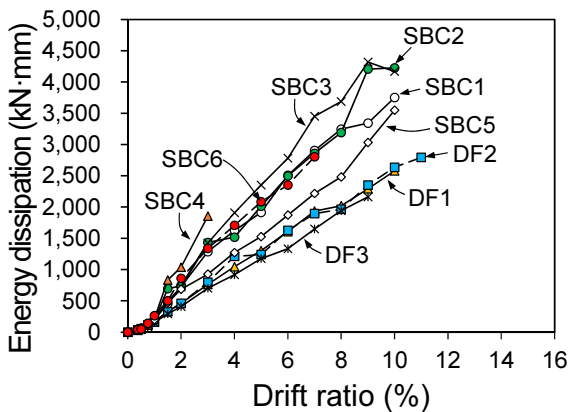


Fig. 10 Energy dissipation

6. 실험결과 분석

Fig. 12는 베이스 플레이트의 두께, 앵커볼트의 매립깊이

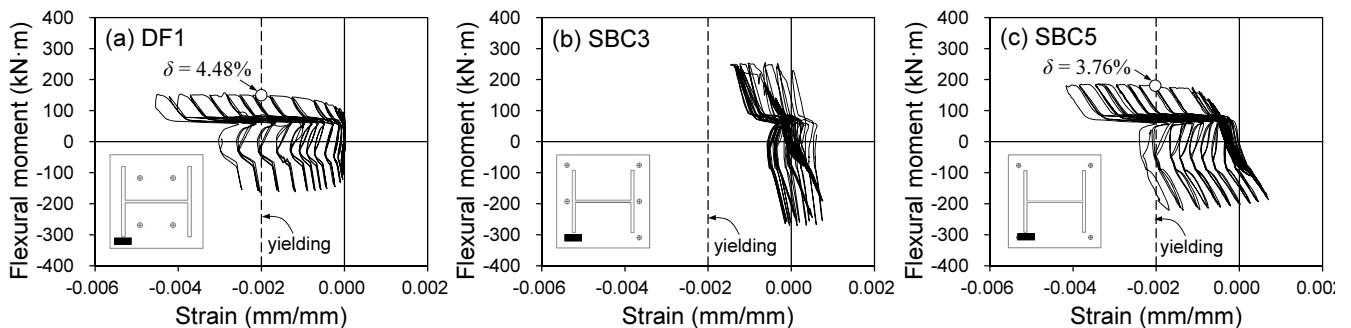
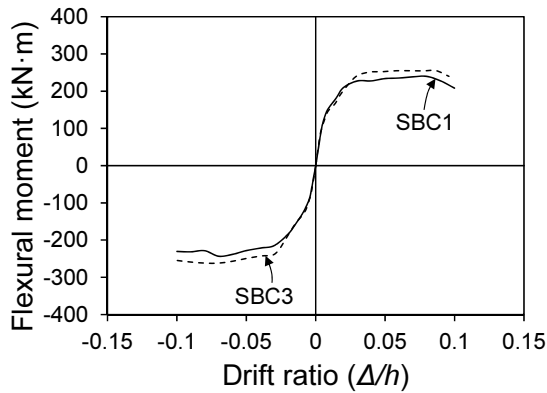
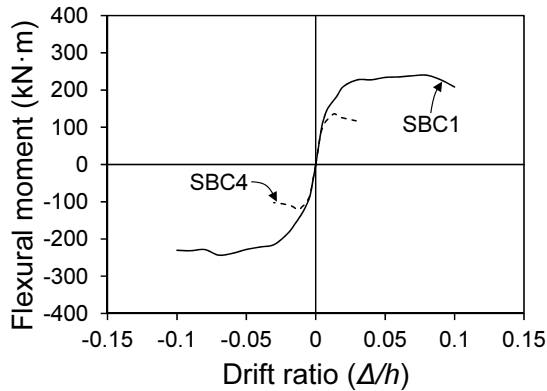


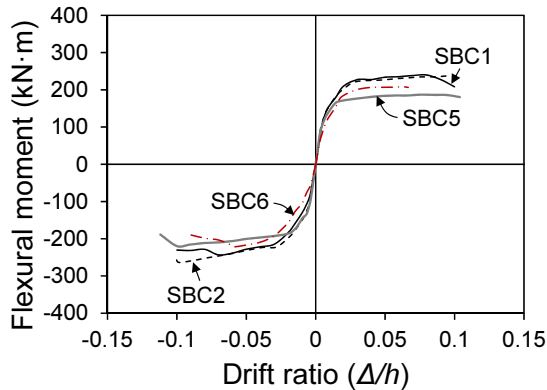
Fig. 11 Strain response at base plate



(a) Thickness of base plate



(b) Embedment length of anchor bolts



(c) Number of anchor bolts

Fig. 11 Effect of test parameters

및 개수 등의 실험변수 영향을 종합적으로 나타내고 있다. 이 연구에서는 노출형 주각부의 휨성능을 알아보기 위하여 베이스 플레이트의 두께, 앵커볼트의 개수와 매립깊이, 앵커볼트 후크의 유무, 그리고 리브 플레이트(Rib plates)의 유무 등을 실험체 변수로 설정하였다. SBC1과 SBC2 실험체의 모멘트-중간변위 관계를 상호 비교한 결과, 리브 플레이트는 주각부의 휨강도와 강성에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 두 실험체 모두 강제 기둥이 소성상태에 도달하기 전 앵커볼트의 뿔힘현상이 발생하였기 때문으로 판단된다. 반면에, 베이스 플

레이트의 두께와 앵커볼트의 매립깊이는 주각부의 휨강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 베이스 플레이트의 두께가 30 mm인 SBC3 실험체의 휨강도는 SBC1 실험체의 휨강도에 비해 약 8% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 기초부에 매립된 앵커볼트의 매립깊이가 구조기준을 만족하는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교한 결과, 매립깊이가 충분히 확보되는 경우 약 78%의 강도 증가효과가 있는 것으로 나타났다. 앵커볼트의 개수 역시 휨강도에 큰 영향이 있는 것으로 나타났다. 리브 플레이트가 없는 경우, 6개의 앵커볼트가 있는 실험체(SBC1)의 휨강도는 4개의 앵커볼트가 있는 실험체(SBC5)의 휨강도에 비해 약 30%의 강도증가를 보여주었으며, 리브플레이트가 있는 경우(SBC2와 SBC6)에는 강도가 약 13.4% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

변수영향을 분석한 결과, 기둥 웨브에 설치된 리브플레이트는 휨강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며, 앵커볼트의 개수와 매립깊이가 주각부 휨거동에 영향을 주는 것으로 나타났다. 베이스 플레이트의 두께는 주각부 휨강도 증가에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 실험결과, 앵커볼트가 항복하기 전 베이스 플레이트가 항복하지 않도록 적절한 두께를 확보하는 것이 중요하다고 판단된다.

7. 결론

이 연구는 소규모 철골조 건축물에 있어서 다양한 상세를 가진 노출형 주각부의 휨성능을 알아보기 위하여 반복가력 실험을 수행하였다. 실험체 주요 변수는 베이스 플레이트의 두께, 앵커볼트의 개수와 매립깊이, 앵커볼트 후크의 유무, 그리고 리브 플레이트(Rib plate)의 유무이다. 반복가력 실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 노출형 주각부의 거동은 앵커볼트의 개수와 매립깊이의 영향이 큰 것으로 나타났다. 하지만, 앵커볼트의 길이가 구조기준을 만족한다고 할지라도 원형 강봉을 앵커볼트로 사용할 경우, 앵커볼트와 콘크리트 사이의 부착력이 충분히 확보되지 않아 슬립형 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 기둥 플랜지 사이에 설치된, 즉 기둥 웨브 양쪽에 설치된 리브플레이트는 앵커볼트의 부착력이 확보되지 않은 경우, 휨강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.
- 2) 실험체의 초기강성과 현행 기준에서 제시하고 있는 값과 비교한 결과, 노출형 주각부의 휨강성은 편접합일 때 휨강성의 최대값보다 크고 구속되었을 때 휨강성 하한값보다는 작은 값을 나타냈다. 앵커볼트의 매립깊이가 현행 구조기준을 만족하고, 앵커볼트에 후크가 설치된 경우, 노출형 주각부의 초기강성은 주각부가 구속되었을 때의 휨강성

하한값의 약 40% 수준인 것으로 나타났다.

- 3) 베이스 플레이트의 두께는 주각부 휨강도 증가에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 실험체 파괴모드를 분석한 결과, 노출형 주각부의 휨강도 증진을 위해서는 앵커볼트가 항복하기 전 베이스 플레이트가 항복하지 않도록 적절한 두께가 확보되어야 할 것으로 사료된다.

종합적으로 본 실험결과에 의하면, 노출형 철골 주각부와 기초부 그리고 앵커볼트 등이 모두 현행 구조기준을 만족한다고 할지라도, 앵커볼트와 기초부 콘크리트 사이의 부착력이 충분하지 않을 경우, 슬립형 거동이 발생하였다. 추후 슬립형 거동을 방지할 수 있는 노출형 철골 주각부 상세 개발이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 도시건축 연구사업(16AUDP-B066083-04)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- ACI T1.1-01 (2001), Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing, American Concrete Institute.
- AISC (2005), Steel Construction Manual, Volume II, American Institute of Steel Construction.
- ANSI/AISC 341-10 (2010), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- Di Sarno, L., Pecce, M. R., and Fabbrocino, G. (2007), Inelastic Response of Composite Steel and Concrete Base Column Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 819-832.
- Drake, R. M., and Elkin, S. J. (1999), Beam-Column Base Plate Design - LRFD Method, *Engineering Journal*, First Quarter, 29-38.
- Fisher, J. M., and Kloiber, L. A. (2006), Design Guide 1: Base plate and anchor rod design, 2nd edition, American Institute of Steel Construction, 13-31.
- Fisher, J. M., and West, M. A., (1997), Design Guide 10 : Erection Bracing of Low-rise Structural Steel Building, American Institute of Steel Construction, 11-18.
- Gomez, I., Deierlein, G. G., and Kanvinde, A. M. (2010), Exposed Column Base Connections Subjected to Axial Compression and Flexure, Final report presented to the American Institute of Steel Construction, AISC Report, 3.1-3.54; B.1.
- Hon, K. K., and Mechers, R. E. (1988), Experimental Behaviour of Steel Column Bases, *Journal of Constructional Steel Research*, 9, 35-50.
- Kanvinde, A. M., Grilli, D. A., and Zareian, F. (2012), Rotational Stiffness of Exposed Column Base Connections: Experiments and Analytical Models, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 138(5), 549-560.
- Korea Concrete Institute (2012), Design Code for Concrete Structures, Kimoondang (in Korean).
- Korean Society of Steel Construction (2014), Korean Steel Structure Design Code and Commentary: Load and Resistance Factored Design, Korean Society of Steel Construction (in Korean).
- KS B 0801 (2007), The Pieces for Tension Test for Metallic Materials, Korean Standard Association (in Korean).
- KS B 0802 (2003), Method of tensile test for metallic materials, Korean Standard Association (in Korean).
- Lee, G. H., You, Y. C., Choi, K. S., Koo, H. J., and Yoo, M. N. (2016), The Numerical Study on Capacity Evaluation of Exposed Steel Column-Base Plate Connection, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(5), 26-34 (in Korean).
- Lee, S. J., and Song, H. S. (2008), A Study on the Structural Behavior of Eccentrically Loaded Steel Column Base Plates, *Korean Society of Steel Construction*, 20(2), 323-332 (in Korean, with English abstract).
- Lim, W. Y., Kang, T. H. -K., and Hong, S. G. (2016), Cyclic Lateral Testing of Precast Concrete T-Walls in Fast Low-Rise Construction, *ACI Structural Journal*, 113(1), 179-189.
- Melchers, R. E. (1992), Column-Base Response Under Applied Moment, *Journal of Constructional Steel Research*, 23, 127-143.
- National Emergency Management (2011), Development of Technologies for Improvement of Seismic Performance on the Existing Low-Rise Buildings, NEMA.
- NZS 3404: Part 1: 2009 (2009), Steel Structures Standard, Part 1: Materials, Fabrication, and Construction, Standards New Zealand.
- Thambiratnam, D. P., and Paramasivam, P. (1986), Base Plates Under Axial Loads and Moments, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 112(5), 1166-1181.
- The Korean Structural Engineers Association (2012), Structural Design Criteria and Commentary for One and Two Story Small Buildings, Kimoondang (in Korean).

Received : 10/11/2016

Revised : 12/02/2016

Accepted : 12/07/2016

요 지 : 본 연구에서는 소규모 철골조에 대한 기존 건축물의 접합부 현황조사와 분석을 통해 노출형 주각부에 대한 내진성능을 평가하였다. 총 9개의 주각부에 대한 반복가력 실험을 통해 휨강도, 변형능력, 그리고 초기강성 등이 조사되었다. 실험의 주요 변수는 베이스 플레이트의 두께, 앵커볼트의 개수와 매립깊이, 앵커볼트 후크의 유무, 그리고 리브 플레이트의 유무이다. 본 실험결과에 의하면, 주각부의 휨거동은 앵커볼트의 개수와 매립깊이, 그리고 베이스 플레이트의 두께에 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면에, 주각부에 설치된 리브플레이트는 휨강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 종합적으로 노출형 철골 주각부와 기초부 그리고 앵커볼트 등이 모두 현행 구조기준을 만족한다고 할지라도, 앵커볼트와 기초부 콘크리트 사이의 부착력이 충분하지 않을 경우, 슬립형 거동이 관측되어 개선이 필요한 것으로 파악되었다. 앵커볼트의 매립깊이가 현행 구조기준을 만족하고, 앵커볼트에 후크가 설치된 경우, 노출형 주각부의 초기강성은 주각부가 구속되었을 때의 휨강성 하한값의 약 15% 수준인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 소규모 철골조, 노출형 주각부, 반복가력 실험, 휨강도, 초기강성
