

강재교각 기초부의 연결상세 개선을 위한 실험적 연구

김희주^{1)*} · 함준수¹⁾ · 양성돈²⁾ · 황원섭³⁾

¹⁾ 박사과정, 인하대학교, 토목공학과

²⁾ 부장, (주)포스코건설 토목기술그룹 토목사업본부 ³⁾ 교수, 인하대학교, 토목공학과

An Experimental Study For Improvement of Joint Detail of Steel Pier - Foundation

Kim, Hee Ju^{1)*} Ham, Jun Su¹⁾ Yang, Sung Don²⁾ Hwang, Won Sup³⁾

¹⁾ Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

²⁾ Team Leader & P.E., POSCO Engineering & Construction Co., Ltd., Incheon, 406-840, Korea

³⁾ Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

ABSTRACT : Generally, a steel pier-foundation has been designed and constructed with a anchor frame. However, because of the complicated design and construction, the foundation's size has become large and has been oversized. In this study, three specimens were made and the tests were conducted to suggest a new shape in regard to the pier-foundation's joint details using the high performance steel. One of the specimens was made up of the general anchors and the anchor frame. Another specimen consisted of the high tension anchors and the studs, and the other specimen was composed of the high tension anchors and the inner steels. After the performance of each specimen was compared and analyzed, the behavior characteristics according to the joint were analyzed.

KEYWORDS : steel pier-foundation, anchor frame, high performance steel, high tension anchor

1. 서 론

구조물에서 발생하는 높은 압축력을 기초에 전달하는 교각 기초부는 구조물의 최하부에 위치하고 있어 여러 하중에 의한 응력이 최대로 집중되는 부분이고 구조물의 구조강도상 가장 중요한 부분이다. 이러한 교각 기초부는 구조물의 자중에 의한 연직방향과 바람 및 지진 등에 의해 발생하는 횡하중의 하중조합에 대한 충분한 강도를 가지도록 설계되어야 한다. 또한, 외부로부터 발생하는 예상치 못한 하중, 반복적인 진동하중 등을 견딜 수 있어야 하며, 구조적인 안정성을 확보해야 한다. 이러한 구조물의 기능에 의하여 시공성을 고려하여 구조물의 연결부위에 위치한 강재교각 기초부에는 앵

커의 사용빈도가 늘어나고 있으며 이에 부합하는 기초형식도 점점 대형화되는 추세이다. 강재교각 기초부를 시공할 때 충분한 강도발현을 위하여 콘크리트 내부에 앵커프레임을 설치하게 되는데 이로 인한 기초부의 시공 규모가 증가하게 된다.

현재 교각 기초부의 설계에 적용되어지고 있는 형식은 Fig. 1과 같이 강재교각부와 기초부, 앵커프레임으로 구성되어 있으며 이를 앵커로 연결하는 형태로 시공하고 있다. 이때 강재교각부에 설치된 베이스플레이트 하면의 콘크리트는 압축력에 저항하고, 인장력에 대해서는 앵커볼트 및 앵커프레임으로 저항하는 것으로 설계되어진다. 또한, 수평력은 앵커볼트로 저항하는 것으로 하며, 그 전단력은 모든 앵커볼트에 균등하게 분포되는 것으로 설계하고, 상·하 베이스플레이트 사이에는 리브를 설치한다. 앵커프레임은 기초콘크리트 내부에 시공되어지는데 Fig. 1과 같이 강재들이 복잡하게 연결되어 있는 형태로 제작하게 된다. 이처럼 앵커프레임의 복잡한 설계와 시공으로 인하여 기초부의 크기가 커지고, 지나치게 과대 설계되는 경향이 있으며 경제적으로 유리하지 못한 구조이다.

Note.-Discussion open until April 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 3, 2012; revised August 19, 2012; approved on September 25, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-32-873-2130; Fax. +82-32-873-2130

E-mail: heeju@inha.ac.kr

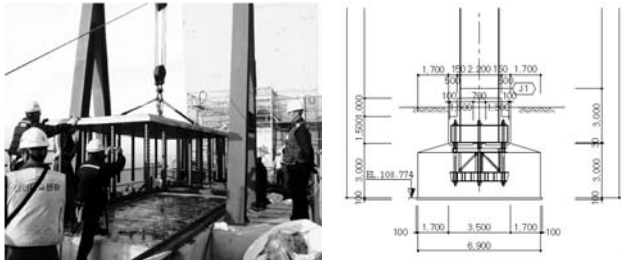


Fig. 1 교각 기초부 설치형상 및 앵커프레임 설계도면
(출처: 고강도강 적용 강재주탑 기초앵커부 상세개발 최종보고서)

기존에 강재교각 기초부의 연결에 대한 연구는 실험과 수치 해석을 비교·분석하여 진행하고 있다. 국내의 경우 김은화(2003)는 기존의 베이스플레이트 설계법을 분석하고, 실험과 수치해석을 통해 주각부의 일반적인 거동과 응력분포를 분석하였다^[1]. 박상민(2004)은 기존의 베이스플레이트 설계기준을 분석하고 실험적 연구를 통하여 베이스플레이트의 구조적 거동에 관한 성능을 평가하며 유한요소해석을 통해 비교·분석하였다^[2]. 박용명(2005)은 강재원형교각 기초부의 연결상세에 대하여 실험을 진행하였으며, 해석을 통하여 실험결과를 검증하고 내부철근의 영향을 분석하였다^[3]. 이대용(2008)은 약축에 대한 기둥-기초부의 접합부 설계를 위해 해석적인 방법을 통하여 Drake&Elkin's method를 평가하고, 구조물의 거동에 영향을 미치는 베이스플레이트의 두께, 앵커볼트의 강성, 그라우트의 압축강도에 대한 영향을 분석하였다^[4]. 국외의 경우 Dajin Liu(2006)는 기존 설계기준에 제시되어있는 각형 베이스플레이트가 아닌 다양한 하중형태를 받는 원형 베이스플레이트의 설계법을 분석하여 제시하였고^[5], Riyadh Hindi(2008)는 나선형으로 구속시킨 새로운 형태의 원형합성기둥을 실험을 통해 합성기둥의 휨거동과 전단거동을 분석하였다^[6]. Meichun Zhu(2010)은 강재와 고강도 콘크리트가 채워진 정사각형 강재기둥의 실험을 통하여 다양한 변수에 따른 강도와 변형특성을 평가하였다^[7]. M.Hamizi(2011)은 강재 베이스플레이트의 들림과 상대슬립을 제안하기 위해서 I형 기둥의 거동을 유한요소해석을 통하여 분석하였다^[8]. 이를 통하여 강재교각 기초부에 대한 연구는 주로 설계기준의 문제점을 분석하고 베이스플레이트에 대한 상세설계변수에 대한 내용이 주를 이루고 있으며, 구조상세개선에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 강재교각 기초부의 연결상세와 관련하여 새로운 형상을 제안하기 위하여 고장력 앵커 및 내부철근을 이용하여 상세를 제안하였으며, 기존에 시공되어지는 앵커프레임을 적용한 시험체를 제작하여 제안된 상세와 성능을 비교할 수 있도록 하였다. 또한 제작된 시험체에 대해 실내실험을 실시하였으며 각 시험체의 성능에 대하여 비교·분석을 한 후, 연결형식에 따른 구조물의 거동특성을 분석하였다.

2. 시험체의 제원 및 재료특성

2.1 시험체의 제작 및 상세제원

본 연구에서는 기존에 시공되고 있는 강재교각 기초 베이스부의 설계와 시공시의 문제점을 파악하고 이를 해결하기 위한 설계 상세를 개발하기 위하여 총 3개의 시험체를 강도로교상세부설계지침(2006), 도로교설계기준(2010)과 콘크리트구조설계기준(2007)의 설계식을 적용하여 제작하였다^{[9][10][11]}.

Table 1은 제작된 시험체의 상세제원으로 교각은 2.5m, 기초부는 0.9m로 제작되었다. 시험체에 사용된 강재는 모두 SM490을 적용하여 제작하였으며, 일반앵커볼트는 M30(SS400), 고장력 앵커는 M30(F8T)을 사용하였다. 교각의 직경은 500mm이며, 두께는 9mm로 공장에서 제작된 구조용 원형 강관을 사용하여 제작하였다. 기초 콘크리트는 실험실에 설치되어 있는 반력 바닥판의 볼트구멍 위치에 맞추어 제작하였으며 크기는 2,210×1,710×900(mm)이고, 내부에 철근을 배치하였다.

Model 1은 기존에 시공되어지는 형태로 강재교각과 기초 콘크리트 및 앵커프레임을 제작하였으며 Model 2와 Model 3의 실험결과를 바탕으로 성능비교를 위한 지표로 사용하였으며 설계형상은 Fig. 3(a)와 같다. Model 2는 본 연구에서 제안하는 새로운 연결형태로 내부앵커프레임을 없애고 고성능강 앵커를 사용하였으며 콘크리트와 앵커의 부착성을 향상시키기 위하여 앵커에 스테드를 양측으로 배치하였다. Model 3은 Model 2와 동일하게 고성능강 앵커를 사용하였으며 스테드 대신 교각과 기초부의 연결성능을 향상시키기 위한 내부철근을 부착하여 제작하였으며 Fig. 3(c)와 같다.

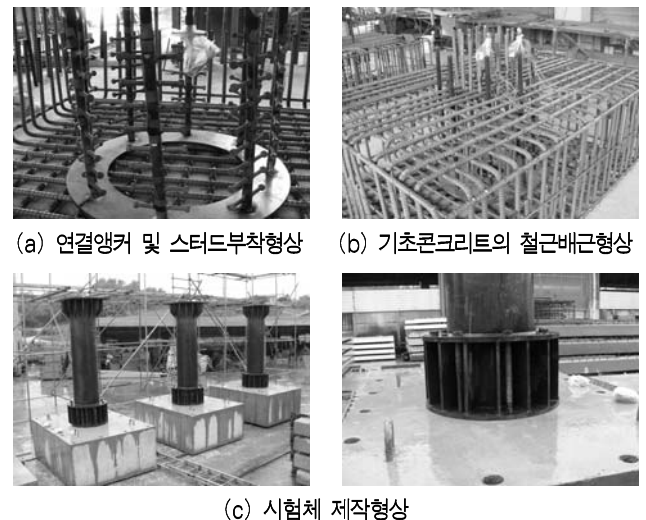


Fig. 2 교각 기초부의 시험체 제작에 대한 상세형상

Table 1. 시험체 제원 (단위 : mm)

		Model 1	Model 2	Model 3
교각부	길이(l)	2500		
	직경	외부직경(D)	518	
		내부직경(D_i)	500	
베이스부	베이스플레이트 간격(D_b)	375		
	베이스플레이트 두께(t_b)	25		
	리브 두께(t_r)	15		
기초부	가로길이(L)	2210		
	세로길이(H)	1710		
	두께(B)	900		

2.2 재료의 기계적 성질

교각 기초부의 설계압축강도는 교각과 기초 각각 40MPa, 30MPa이며, 압축강도 시험은 직경에 대한 높이의 비가 2인 $10 \times 20cm$ 의 원주형 공시체에 의해 이루어졌으며, 몰드(Mold)는 불투수성 플라스틱 몰드를 사용하였다. 이 몰드에 KS F 2403 "콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법"에 의하여 공시체를 제작하였고, 28일 양생 후의 공시체($\Phi 10 \times 20cm$)의 압축강도는 Table 2와 같이 39.7MPa, 28.4MPa이 나왔다. 강재의 경우 Table 3에서 보는 바와 같이 시험체에 사용된 9mm의 강관에 대한 인장시험을 실시하여 인장시험편을 제작하여 항복응력, 인장강도, 연신율 등을 측정하였으며 고장력 앵커와 철근에 대한 재료특성은 Table 4, Table 5와 같다.

Table 2. 콘크리트의 기계적 성질

공시체	압축강도 (N/mm ²)	평균압축강도 (MPa)	설계강도 (MPa)	평균압축강도 / 설계강도(%)
1	38	40	40	95
2	39			97
3	42			106
12	31	28	30	104
13	28			93
14	29			97

Table 3. 강재의 기계적 성질

순번	항복강도 (MPa)	극한강도 (MPa)	연신율 (%)
1	326	523	31
2	320	524	30
3	323	516	33
평균	323	521	31

Table 4. 고장력 앵커의 기계적 성질

앵커 종류	기계적 성질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	단면적 감소율 (%)	신장률 (%)
F8T (M30)	695	862	66	21

Table 5. 철근의 기계적 성질

철근 종류	기계적 성질	
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
SD40 (D22)	433	643

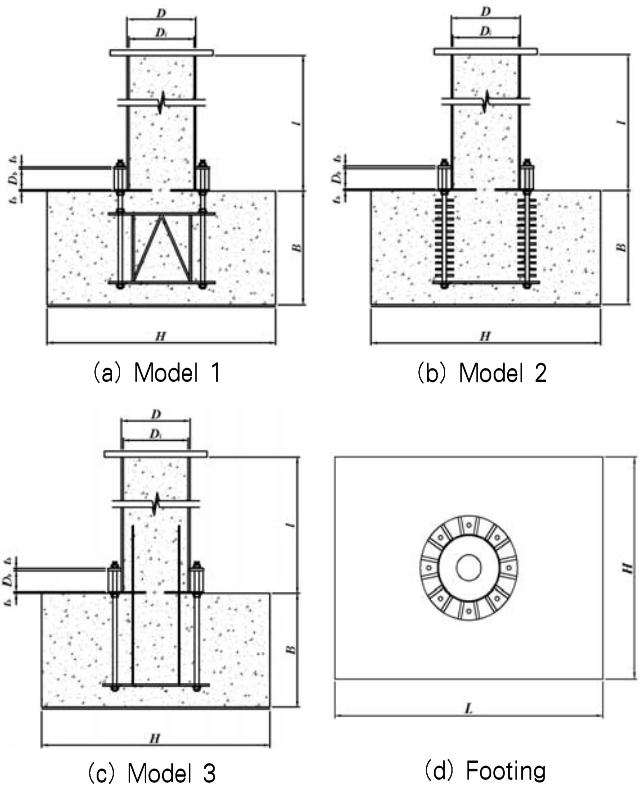


Fig. 3 교각 기초부의 시험체 단면도

3. 교각 기초부의 재하실험

3.1 실험장치

가력장치는 1,000kN 용량의 액추에이터 2개를 사용하여 Control Box를 통해 기동 최대 축하중(P_u)인 7,500kN의 약 20%인 1,500kN의 하중을 시험체에 가력하였다. 이 때 하중재하방식으로 양쪽 액추에이터에 하중의 절반인 750kN씩을 분담하여 실험이 종료될 때까지 일정한 하중이 가력되도록 하였다. Fig. 4는 2개의 액추에이터를 설치한 형상이다. 각각 1,000kN을 재하할 수 있는 것으로 동적재하가 가능한 액추에이터와 정적재하가 가능한 액추에이터 2가지 타입을 사용하였다. Fig. 4와 같이 횡하중을 재하할 수 있는 2,000kN 용량의 액추에이터를 사용하여 변위제어(displacement control) 방식으로 실시간 측정되도록 하였으며, 반복적인 횡하중을 가력하였다. 시험체에 횡하중을 재하할 수 있도록 하중재하프레임

을 연결하여 축하중과 횡하중을 동시에 재하하였다. Fig. 5는 강재교각 기초부의 실제 실험형상을 나타낸 것이다.

3.2 하중재하방법

교각 기초부의 구조상세 성능을 실험하기 위하여 준정적 재하 실험을 수행하였다. 하중재하는 축하중과 횡하중을 동시에 재하하였으며 이 때 기둥에 축하중은 1,000kN 용량의 액추에이터 2개를 사용하여 3.1의 실험장치에 기술한대로 하중을 산정하여 시험체에 재하하였다. 또한 횡하중을 재하할 때 2,000kN의 액추에이터에 Fig. 6과 같이 변위재하를 실시하여 반복하중을 가력하였으며 이 때의 횡하중은 예비해석을 통하여 산출된 최대탄성하중(H_y)인 180kN에 해당하는 최대탄성변위인 25mm(δ_y)를 기준으로 하여, $\pm 0.25\delta_y$, $\pm 0.375\delta_y$, $\pm 0.5\delta_y$, $\pm 0.75\delta_y$, $\pm 1.0\delta_y$, $\pm 1.5\delta_y$, $\pm 2.0\delta_y \sim \pm 7.0\delta_y$ 까지 횡하중 액추에이터를 이용하여 변위재하를 실시하였다. 이 때, 0.25 ~ 7.0 δ_y 까지 2회 반복하였다.

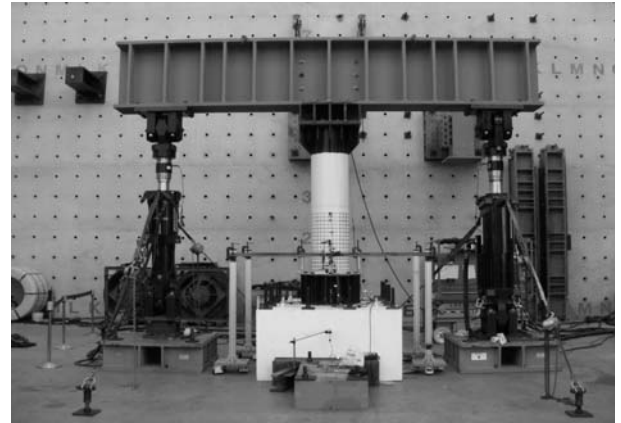
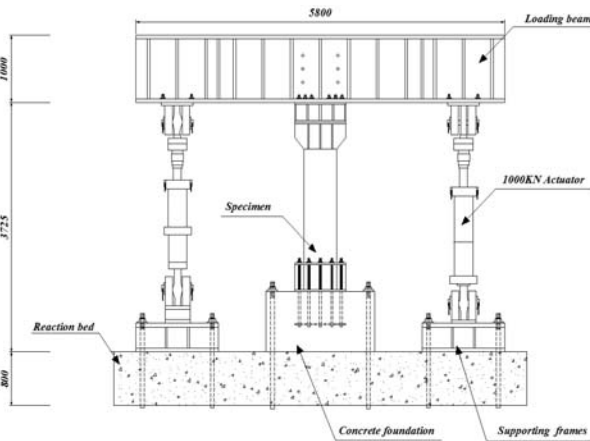
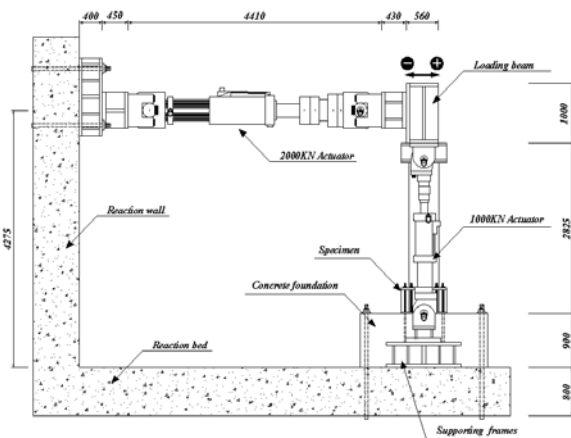


Fig. 5 강재교각 기초부의 실험전경



(a) 정면도



(b) 측면도

Fig. 4 교각 기초부의 재하실험 거치형상

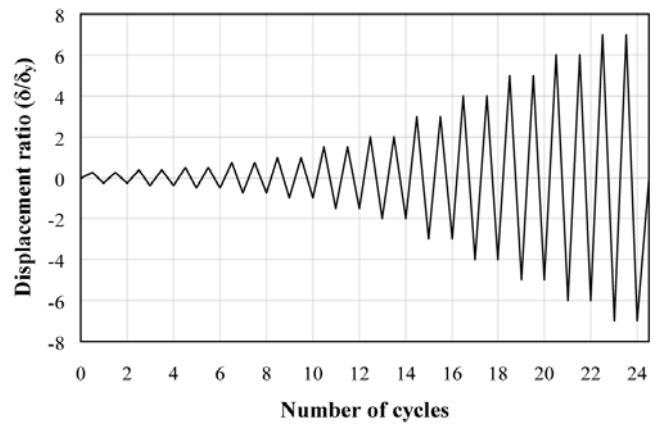


Fig. 6 Cyclic loading sequence

3.3 측정항목 및 위치

교각 기초부의 항복값과 각 구간의 변형률을 얻기 위하여 Table 6과 같이 각각의 측정항목에 대해 변형률게이지 및 LVDT를 설치하였다. 교각부에는 교각의 1/2, 1/4 위치에 총 8개의 변형률게이지를 설치하였으며, 시험체의 전체 횡변위를 계측하기 위하여 재하프레임 상단부에 줄변위계를 연결하여 계측하였다. 재하시 변위제어는 실험장치내의 변위를 사용하지만 시험체의 횡변위는 줄변위계 값에 의해 측정값을 사용한다. 베이스부에는 리브가 분담하는 응력을 확인하기 위하여 하중방향 리브에 대칭으로 변형률 게이지를 설치하였으며, 가장 많은 하중을 받는 앵커볼트에 변형률게이지를 부착하여 응력을 측정하였다. 또한 베이스플레이트의 drift angle을 계측하기 위하여 4곳에 LVDT를 설치하였다. 앵커부는 본 연구에서 가장 주요하게 다루는 인자로 기초콘크리트에 설치된 일반앵커, 고장력 앵커, 내부철근의 응력을 계측하기 위하여 상, 중, 하 3곳에 변형률 게이지를 부착하여 데이터를 측정하였다.

Table 6. 시험체의 측정항목에 대한 수량

	측정항목	수량		
		Model 1	Model 2	Model 3
교각부	변형률게이지	8	8	8
	LVDT	3	3	3
베이스부	변형률게이지	6	6	6
	LVDT	4	4	4
앵커부	변형률게이지	24	24	32
	LVDT	1	1	1

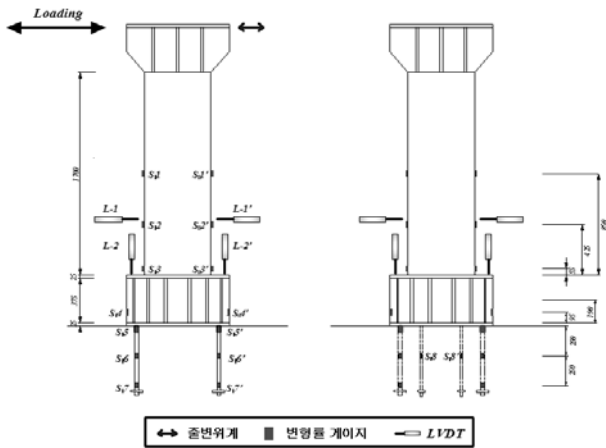
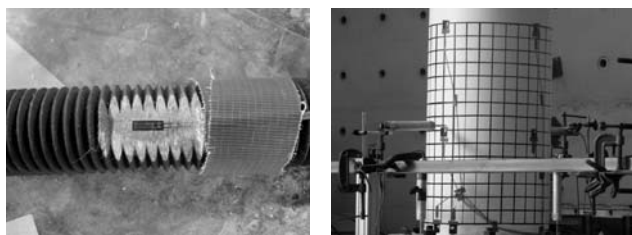


Fig. 7 시험체에 따른 측정항목 위치도



(a) 변형률 게이지 형상

(b) LVDT 부착형상



(c) 줄변위계 부착형상

Fig. 8 측정항목에 따른 게이지 부착형상

4. 실험결과

4.1 파괴형상

교각 기초부의 파괴형상은 교각부, 베이스부, 앵커부로 크게 3가지 형태로 구분할 수 있다. 교각부의 하단부에 국부좌굴이 발생하여 파괴가 되는 경우와 베이스부에 위치한 베이스플레이트 변형 또는 앵커의 파단에 의한 파괴, 마지막으로 앵커부 콘크리트의 균열에 의한 파괴로 구분된다. 본 연구에서는 반복재하하중에 의하여 2가지 형태의 파괴형태를 확인할 수 있었다.

Model 1과 Model 2는 베이스부의 앵커파단에 의한 파괴가 발생하였다. 재하초기단계에서는 교각 기초부에 설치된 앵커에 하중이 집중되어 반복 횟수에 의해 Fig. 9에서 보는 바와 같이 Model 1과 Model 2 모두 앵커의 인발현상이 발생하였다. 또한 횡하중이 커짐에 따라 이중 베이스플레이트 하단부의 들림현상이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

위에서 서술한 현상이 반복적으로 발생하게 되면 최종적으로 앵커볼트의 파단에 의한 파괴형식을 확인할 수 있다. 이는 교각부에서 전달되는 하중이 연결부에 집중되어 베이스부에 설치된 앵커가 항복에 도달하게 되어 파괴가 발생한다. 이 때, Model 1에 설치된 일반앵커는 넥킹현상에 의한 파괴가 발생하였고 Model 2에 설치된 고장력 앵커는 그 특성에 의해 취성파괴가 발생하여 파괴가 발생하였다.

Model 3은 Model 1, Model 2와 마찬가지로 재하초기단계에서는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 앵커의 인발현상과 베이스플레이트의 들림현상을 보였다. 일반앵커와 고장력 앵커를 설치한 모델과는 다르게 내부철근을 배치한 Model 3에서는 반복하중이 커짐에 따라 최종적으로 Fig. 10과 같이 교각과 베이스플레이트가 만나는 교각부 하단에 국부좌굴이 발생하는 파괴형식을 보였다. 이러한 파괴형식은 교각과 기초를 연결하는 앵커 베이스부와 Model 3에 설치된 교각부 내부에 위치한 내부철근이 하중을 동시에 분담하기 때문에 베이스부의 응력분담률을 감소한 것으로 보이며 내부철근의 설치로 인하여 교각 기초부의 성능을 충분히 발휘하는 것으로 확인된다.

또한 교각부에 발생한 교각의 국부좌굴은 앞서 설명한 앵커부의 파괴에 비해 변형성능이 우수한 것으로 판단되며 내부철근의 배치로 인하여 앵커에 집중되는 하중분담률을 감소시켜 기존에 시공되고 있는 앵커프레임을 적용하지 않아도 변형성능을 적절히 구현한다는 것을 확인할 수 있었다.

Model 3에서는 다른 시험체와 다르게 기초부에서도 균열이 발생하였는데 이는 교각부, 베이스부, 앵커부에 축하중과 반복하중이 적절히 재분배 되고 있음을 알 수 있다.

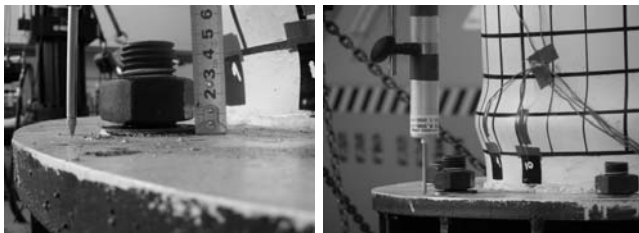


(a) 앵커의 인발현상 (b) 베이스플레이트의 들림



(c) 고정력 앵커의 취성파괴형상

Fig. 9 Model 1과 Model 2의 파괴형상



(a) 앵커의 인발현상 (b) 앵커의 인발과 국부좌굴형상

Fig. 10 Model 3의 파괴형상

4.2 변형률분포 특성

4.2.1 교각부의 변형률분포 특성

교각부에는 변형률 게이지 S1(580mm), S2(425mm), S3(55mm)를 Fig. 7과 같은 위치에 설치하였으며, S1', S2', S3' 는 대칭되는 위치에 설치하였다. 설치한 변형률 게이지의 측정값으로부터 각 기초형식에 따른 교각부의 탄성거동을 비교·검토하였다.

교각부에서 가장 큰 변형률이 발생하는 위치는 교각의 하단부인 S3와 S3'이므로 이 위치에서의 변형률을 탄성구간내에서 비교·검토하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 하중변화에 따른 변형률 관계를 나타낸 것으로 동일하중일 때 기존 앵커프레임을 제작하여 만든 Model 1에 비하여 Model 2와 Model 3의 변형률이 크게 발생하였으나 그 값의 차이가 최대 7% 내외이므로 유사한 경향을 보인다고 할 수 있다. 또한, 인장측에서 Model 2가 Model 1과 3에 비하여 변형률이 적게 발생하였고 이는 스티드에 의한 콘크리트의 부착효과로 인하여 변형률이 적게 발생한 것으로 판단된다.

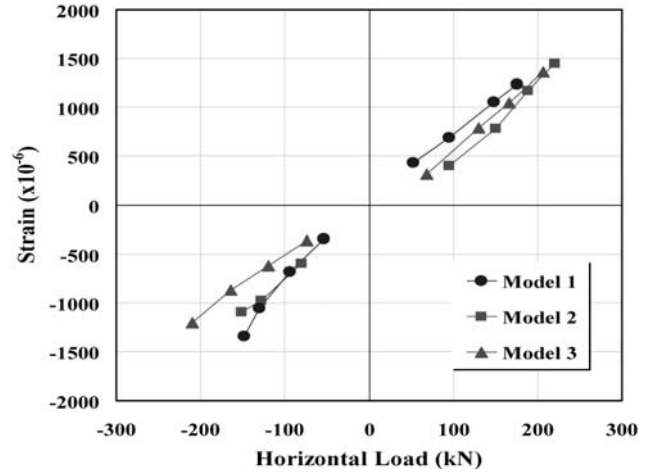


Fig. 11 하중변화에 따른 변형률 관계곡선 (S3)

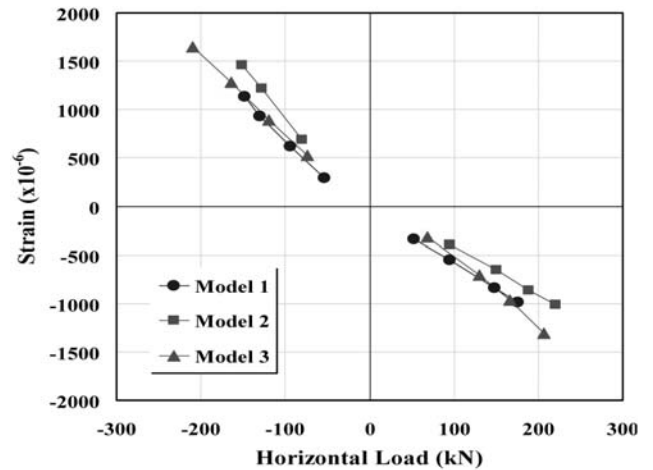


Fig. 12 하중변화에 따른 변형률 관계곡선 (S3')

4.2.2 베이스부의 변형률분포 특성

Fig. 13은 리브의 S4위치에 있는 A, B의 게이지에 대한 측정데이터로 변형률 측정값을 x축은 횡하중, y축은 변형률로 하여 나타내었다. 이중베이스플레이트 사이에 부착한 리브의 변형률은 기존형 앵커프레임이 설치된 Model 1의 경우 Model 2와 비교하였을 때 동일하중대비 최대 46%, Model 3과 비교하면 68% 변형률이 적게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 내부철근이 설치된 Model 3은 다른 시험체에 비하여 정착부의 고정도가 높아 변형률이 크게 발생하는 것으로 보였다. 이는 베이스부에 가해지는 하중이 Model 1과 Model 2의 경우 앵커부에 집중되는 반면 Model 3은 교각하단부에 집중되는 영향인 것으로 판단된다.

Fig. 14는 C, D의 게이지에 대한 측정데이터로 앵커볼트의 파괴가 발생한 근처의 리브에 위치한 D에서 최대 변형률이 발생하였으며 Model 3과 비교하였을 때는 최대 약 3배 이상의 변형률이 발생하였다. 이는 스티드에 의한 콘크리트의 부착효과로 인하여 들림현상이 작아지는 반면에 리브에 작용하

는 압축력은 Model 1과 Model 3에 비하여 증가하기 때문이라고 판단된다.

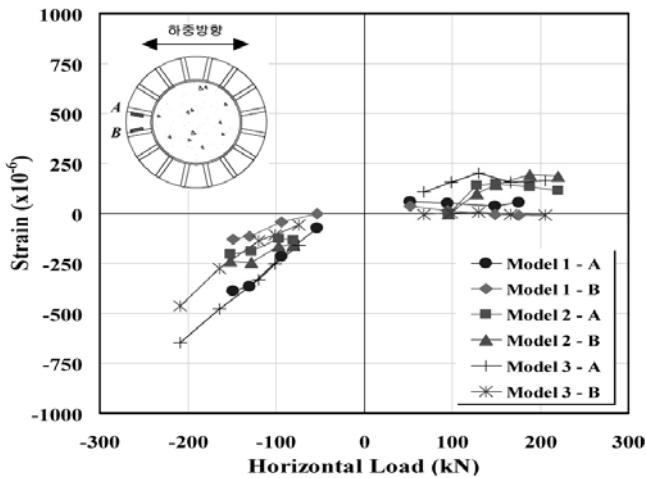


Fig. 13 시험체 형상에 따른 변형률 게이지 비교 (A, B)

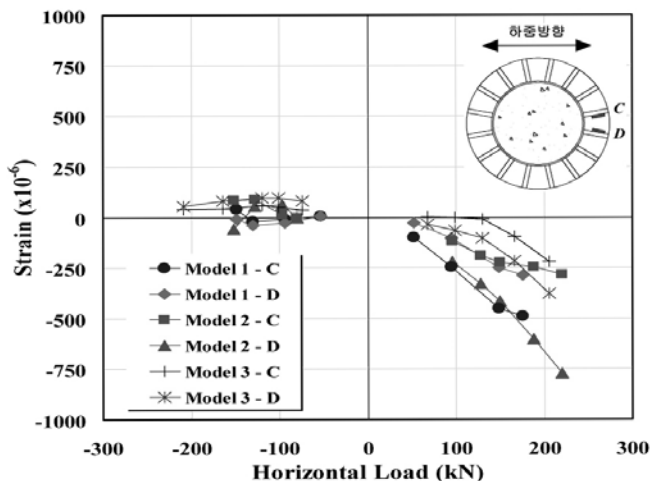


Fig. 14 시험체 형상에 따른 변형률 게이지 비교 (C, D)

4.2.3 앵커부의 변형률분포 특성

앵커부에서 가장 큰 변형률이 발생하는 위치는 앵커의 상단부인 S5 위치이므로 이 위치에서의 각 기초부 형식에 따른 변형률을 비교·검토하였다.

Fig. 15는 앵커 상단부 S5 위치에서의 하중 변형률관계를 나타낸 것으로 Model 1과 Model 3의 인장측 앵커에서는 하중이 증가할수록 인장변형률도 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 압축측의 앵커는 압축변형률은 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 Model 2는 인장변형률뿐 아니라 압축변형률도 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 스티드에 의하여 콘크리트의 압축응력이 앵커에 전달되어 압축변형률이 발생하였다고 판단된다.

동일하중이 작용할 때 인장측 앵커의 변형률은 Model 1이

Model 2와 Model 3에 비하여 더 크게 발생한 것을 알 수 있었다. 또한 Model 2는 Model 1과 Model 3에 비해 변형률이 더 작게 발생하였지만 앵커부의 파괴가 발생하였다. 이는 스티드에 의해 하부에 의지한 스티드의 변형없이 상단에 위치한 스티드에 의해 응력집중이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 16과 Fig. 17은 시험체 종류에 따른 앵커볼트 위치 A에서의 변형률을 비교한 것으로 각각 $0.5\delta_y$ (12.5mm)일 때와 $1.0\delta_y$ (25mm)일 때를 비교하여 나타낸 것이다. 최대하중이 발생하는 위치 B에서의 변형률을 비교하여야 하지만 Model 1의 경우 변형률 게이지의 고장으로 인하여 데이터를 측정하지 못하였다. 그러므로 A와 C 위치 중 가장 많은 데이터를 비교할 수 있는 위치 A를 선정하여 이를 비교하였다.

Fig. 16은 초기탄성구간인 $0.5\delta_y$ 일 때를 나타낸 것으로 기존형 앵커프레임을 제작한 Model 1의 변형률이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Model 2는 스티드가 부착된 고장력 앵커로 초기탄성구간에서는 다른 Model 1과 Model 3에 비하여 변형률이 적게 발생하였다. Model 3에 설치된 내부철근의 경우 앵커볼트와 유사하거나 그보다 큰 변형률이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 17은 최대탄성구간인 $1.0\delta_y$ 일 때의 변형률을 나타낸 것으로 Model 1의 경우는 초기탄성구간과 마찬가지로 앵커 상단부에 변형률이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 그 크기는 약 3배 이상 증가하였다. Model 2의 경우 고장력 앵커의 스티드 영향으로 인하여 변형률이 증가하는 경향을 보였으나 앞절에서 설명한 것처럼 스티드의 영향으로 인하여 인장측 뿐만 아니라 압축측에서도 변형률이 발생하므로 다른 시험체에 비하여 적은 변형률이 발생하는 것으로 판단된다. Model 3의 경우는 내부철근이 동일한 위치에서 앵커볼트와 비교하였을 때 변형률이 유사하거나 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

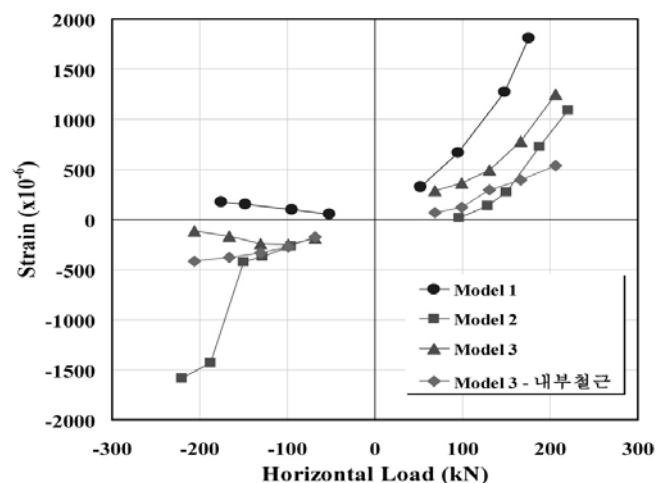


Fig. 15 앵커볼트 위치 S5(A)에서의 변형률 비교

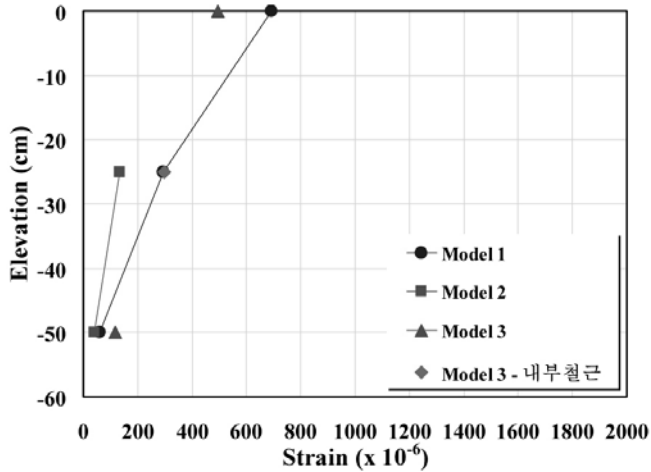


Fig. 16 앵커볼트 위치A에서의 변형률 비교(0.5 δ_y)

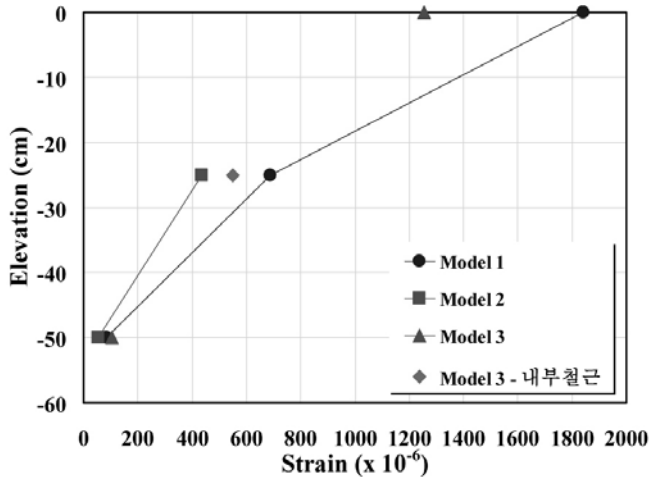


Fig. 17 앵커볼트 위치A에서의 변형률 비교(1.0 δ_y)

4.3 강도특성

기초부의 강도특성을 확인하기 위하여 각각의 시험체의 하중-변위관계 곡선을 이용하여 다양한 형태로 강도특성을 분석하였다.

4.3.1 교각부의 강도특성

Fig. 18은 각 시험체별 cyclic loading에 의한 교각부의 횡변위를 나타낸 것이다. 횡방향 액츄에이터를 이용하여 반복하중을 가려하였을 때 초기 탄성구간인 25mm까지는 Model 1의 경우 4.38mm(인장측), Model 2는 3.64mm(인장측), Model 3은 4.01mm(인장측)으로 각 시험체가 모두 유사한 거동을 보이고 있다. 또한 탄성구간 이후로 반복하중이 증가할수록 Model 1이 Model 3에 비해 동일하중에서 횡변위가 약 22% 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Model 1은 기존형

앵커프레임을 설치한 모델로 교각부와 앵커부를 연결하는 일반앵커에 의해서만 하중을 전달할 수 있는 반면에 Model 3은 일반앵커대신 고장력 앵커와 교각부 내부에 설치된 철근으로 인하여 연결강성이 증대되어 하중을 분담하므로 Model 1에 비해 횡변위가 적게 발생한다고 판단된다.

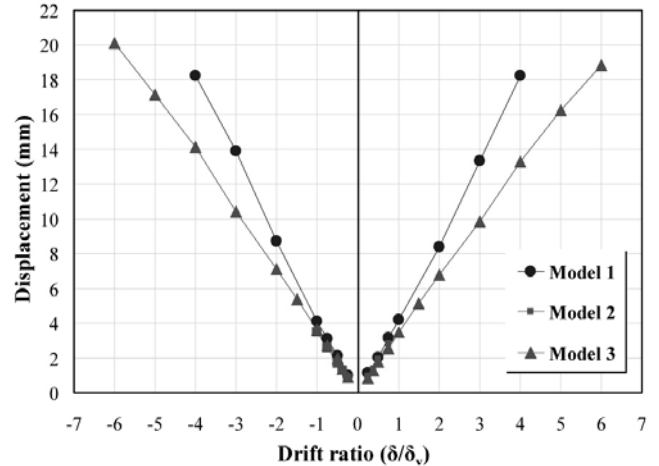


Fig. 18 cyclic loading에 의한 교각부의 횡변위 비교(L-1)

4.3.2 베이스부의 강도특성

Fig. 19는 각 시험체별 cyclic loading에 의한 횡변위와 베이스플레이트의 들림변위 곡선이고, Fig. 20은 각 시험체별 cyclic loading에 의한 하중-변위관계에서 각 cycle마다 최대점을 확인하여 나타낸 것이다. Model 1과 Model 3은 Fig. 19에서와 같이 횡변위가 25mm 이후부터 들림변위가 현저하게 증가하는 것을 확인할 수 있으며 Fig. 20에서는 25mm까지 기울기가 일정한 탄성거동을 보이는 것을 알 수 있으며 이를 통해 횡변위가 25mm일 때 시험체가 항복하였다고 판단된다. 또한 횡변위가 50mm 이후부터 Model 1은 Model 3에 비해 베이스플레이트의 들림변위가 더 크게 계속되었으며 이는 Model 3에서 횡변위가 50mm일 때 국부좌굴이 발생하여 들림변위의 증가량이 감소하였기 때문이라고 판단된다. Model 2는 Fig. 19에서와 같이 제안된 항복변위 25mm까지 베이스플레이트의 들림변위가 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 20에서는 25mm까지는 Model 1과 Model 3과 마찬가지로 일정한 기울기를 가진 탄성거동을 보이는 것을 확인할 수 있으며 제안된 항복변위 이후 고장력 앵커에 취성파괴가 발생하였다.

베이스부는 탄성구간 이후 반복하중이 증가할수록 일반앵커에 비해 고장력 앵커의 들림각이 더 적게 발생하는 것으로 보였다. 이는 일반앵커를 시공한 Model 1의 경우 반복하중에 의한 앵커의 연성작용으로 인하여 고장력 앵커에 비해 변

위가 더 크게 발생하여 들림각이 큰 경향을 보인다고 판단된다. Model 1의 최대 들림각은 0.96° 이고 Model 3의 최대 들림각은 0.59° 로 계측되었다.

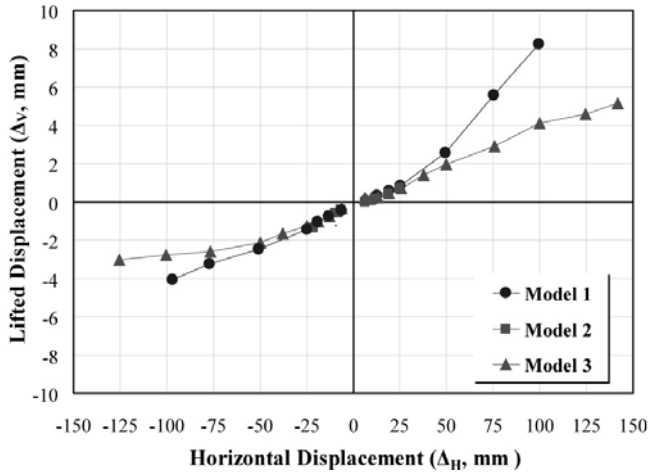


Fig. 19 베이스플레이트의 들림변위 비교(L-2)

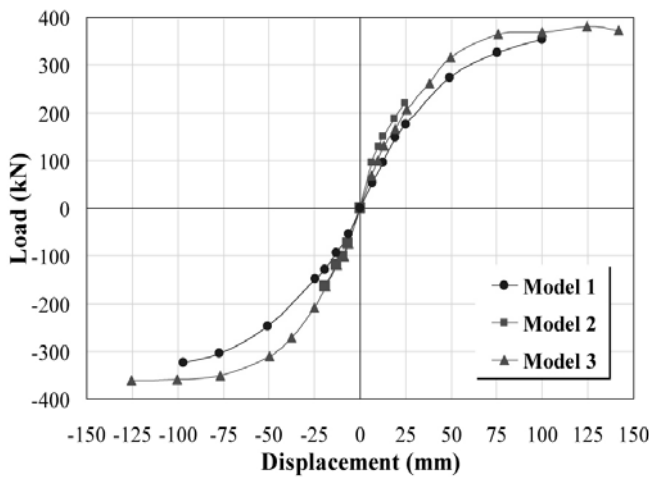
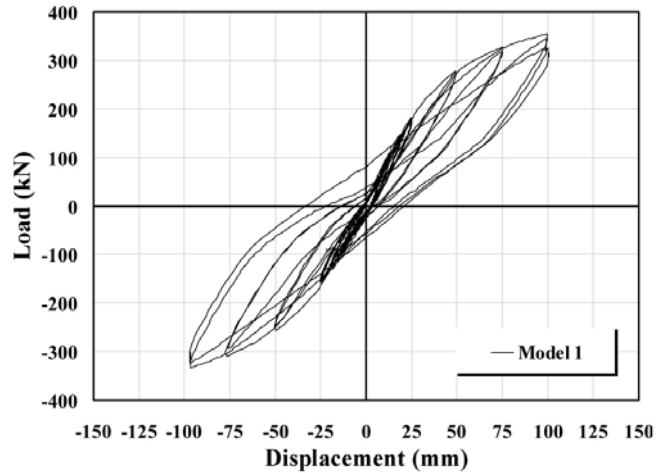


Fig. 20 하중-변위관계에서의 최대값 곡선

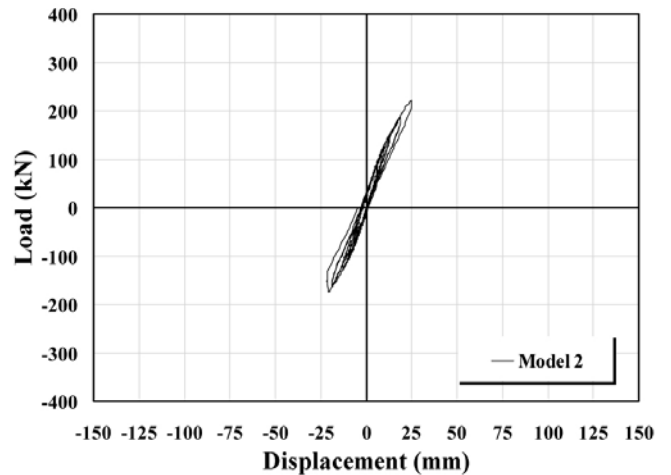
4.3.3 하중-변위관계

Fig. 21은 교각 기초부 형식에 따른 하중-변위관계 비교형을 나타낸 것으로 초기 탄성구간과 소성구간의 거동차이를 확인할 수 있다. 초기 탄성구간은 일반앵커에 비해 고강도앵커의 강도가 크므로 약간의 차이를 보였다. Model 2는 스테드의 설치로 인하여 고장력 앵커에 인장하중이 가중되어 탄성구간 이후 취성파괴되는 것을 확인하였다. Model 1은 일반앵커의 연성파괴로 인하여 고장력 앵커와 달리 기초부에 하중을 전달하는 성능이 더 좋은 것을 확인하였으나, 고장력 앵커와 마찬가지로 볼트가 파괴되는 형상을 보였다. 그에 비하여 Model 3은 고장력 앵커를 사용하여 일반 앵커보다 더 높은 강도를 확보할 수 있으며, 내부철근으로 인하여 교각과 기

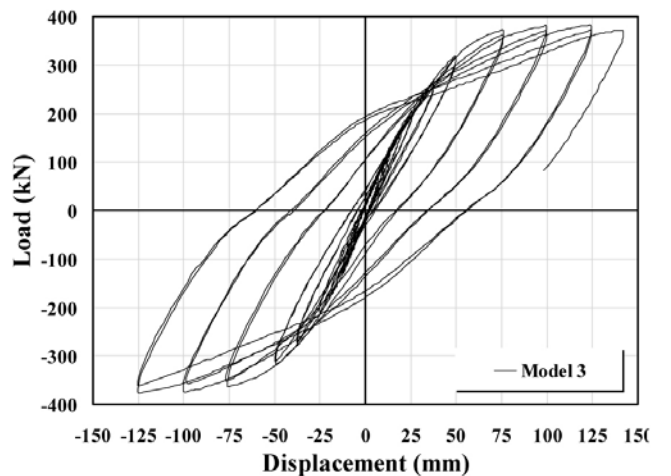
초부에 하중을 전달하는 능력이 다른 시험체에 비해 효과적으로 작용하는 것을 알 수 있었다. 이는 교각부와 기초부의 하중을 전달하는 연결형식이 시험체 설계에 있어 중요한 인자가 됨을 확인할 수 있다.



(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

Fig. 21 강재교각 기초부의 하중-변위관계 형상

4.4 항복변위 및 변위연성도

본 연구에서는 이론에 의한 항복하중과 항복변위를 제시하고, 본 실험에서 얻어진 항복하중과 항복변위를 산출하여 제시하였다.

Fig. 22와 Fig. 23은 항복변위를 산출한 것으로 cyclic loading에 의한 하중-변위관계에서 cycle 마다 최대점을 확인하여 이를 그림으로 나타낸 것이다. Table 7과 같이 최대하중 (V_{max})과 최대하중의 75%($0.75V_{max}$)를 실험에 의하여 산출하여 나타낼 수 있었다.

Model 1과 Model 3의 경우 Table 7에 제시한 것과 같이 항복변위와 극한변위를 통하여 변위연성도를 산출할 수 있는데 이는 각각 1.66, 2.53으로 나타났다. Model 2의 경우 앵커볼트의 취성파괴로 인하여 실험이 중단되었으므로 시험체의 항복변위와 극한변위를 확인할 수 없었다. Model 3이 Model 1에 비하여 변위연성도가 1.52배 증가하는 경향을 보였으며 내부철근의 설치로 인하여 유리한 연성능력을 발휘하고 있음을 보이고 있다.

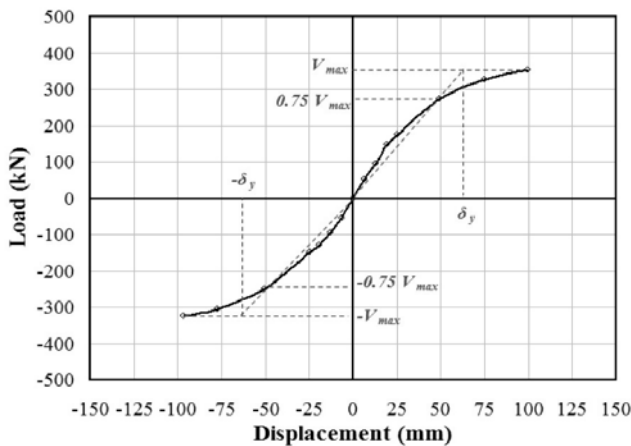


Fig. 22 하중-변위관계곡선에서의 항복점 산출(Model 1)

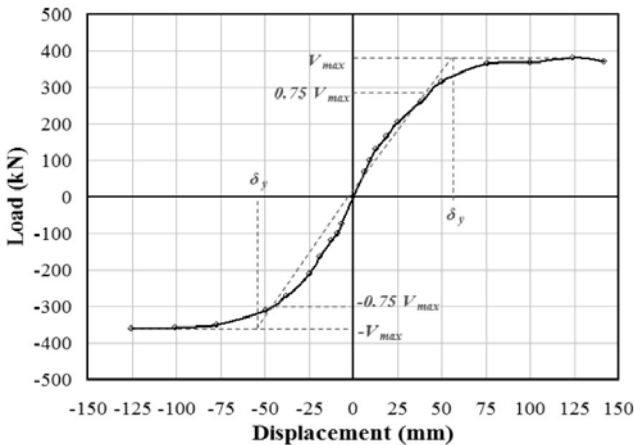


Fig. 23 하중-변위관계곡선에서의 항복점 산출(Model 3)

Table 7. 시험체의 변위연성도

시험체명	항복		극한		변위연성도
	하중 (kN)	변위 (mm)	하중 (kN)	변위 (mm)	
Model 1	256.56	60.22	354.08	99.7	1.66
Model 3	285.54	56.15	371.92	141.86	2.53

5. 결론

본 연구에서는 교각 기초부의 연결상세와 관련하여 실험을 통하여 구조적 거동을 파악한 것으로 기존 교각 기초부의 설계 및 시공 형식을 분석하고 이에 대한 시험체를 제작하였다. 기존 설계기준에 의해 앵커프레임을 제작할 때 발생할 수 있는 설계의 복잡화, 구조의 거대화 등의 문제점을 보완하고자 고장력 앵커와 스테드, 고장력 앵커와 내부철근을 이용한 새로운 형식의 시험체를 제작하여 실내실험을 수행하였다.

또한 실내실험을 통하여 얻어진 교각부, 베이스부, 앵커부에 작용하는 하중 및 변형률 데이터를 바탕으로 교각 기초부의 각 시험체에 대한 구조적 거동특성을 파악하였다.

다음은 교각 기초부 실험을 통해 얻어진 결론이다.

- (1) 강재교각 기초부의 구조상세를 개선하기 위하여 2가지 새로운 형상을 제안하였으며 이에 대한 성능을 평가하였다. 기존연구에 제시되어 있는 세부 설계기준에 대한 설계변수를 분석하여 고장력 앵커와 스테드, 내부철근을 이용하여 새로운 형상을 설계하고 이를 실험하였으며, 기존형인 앵커프레임을 제작한 시험체를 제작하여 새로운 형상에 의한 성능을 평가하였다. 하중-변위관계곡선을 통하여 고장력 앵커, 스테드, 내부철근이 앵커프레임의 역할을 분담하는 것으로 판단된다.
- (2) 새롭게 제안된 형상인 Model 2와 Model 3의 거동특성을 바탕으로 앵커프레임의 효과를 유리하게 발현하는 모델을 확인할 수 있었다. Model 2는 초기 변형률이 Model 3에 비하여 최대하중이 220.24kN으로 약 61%만 발휘되는 것으로 확인되었으며, 이는 스테드의 시공에 의한 응력집중에 의한 것으로 판단된다. 내부철근이 설치된 Model 3의 경우 최대하중이 371.92kN으로 다른 시험체와 달리 강재교각부 하단에 국부좌굴이 발생하는 형태로 파괴가 진행되었으며 교각부와 베이스부, 앵커부에 적절한 응력이 배분되었으며 이는 앵커프레임없이 고장력 앵커와 내부철근만으로도 앵커프레임의 효과를 적절히 반영하고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 횡하중이 작용하였을 때 앵커부의 변형률에 대한 거동특

성을 파악할 수 있었다. Model 1과 Model 3의 경우 모멘트의 작용에 의하여 인장측의 앵커는 변형률이 발생하는 반면 압축측의 앵커는 베이스플레이트 하단부에 위치한 콘크리트는 지압응력이 발생하고 앵커부에는 응력이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Model 2의 경우 앵커에 설치된 스티드로 인하여 압축측 앵커에서도 콘크리트 지압에 의한 스티드 눌림 효과로 인하여 앵커부에 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Model 3의 경우 동일한 위치에서 앵커부와 내부철근의 변형률이 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 이는 모멘트가 작용하면서 앵커부에 집중되었던 응력이 내부철근이 설치된 Model 3의 경우 앵커부와 내부철근이 나눠서 응력을 부담하는 것으로 판단된다.

- (4) 하중-변위관계 곡선을 이용하여 시험체의 항복변위와 극한변위를 확인할 수 있었다. Model 1과 Model 3의 변위연성도는 각각 1.66, 2.53으로 나타났으며, Model 3이 Model 1에 비해 약 1.56배 증가하는 경향을 보였다. 이를 통하여 내부철근이 배치된 Model 3이 기존 앵커프레임을 설치한 Model 1과 비교하였을 때 유리한 연성능력을 보인다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 연구비 지원사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다.

참 고 문 헌(References)

- [1] 김은화(2003) 중심축하중을 받는 베이스플레이트 설계법, 석사학위논문, 호서대학교.
Kim, E.H. (2003) Design of steel column base plates for concentric load, Master's Thesis, Hoseo University (in Korean).
- [2] 박상민(2004) 강구조 주각부의 구조거동에 관한 해석적 연구, 석사학위논문, 아주대학교.
Park, S.M. (2004) An Experimental study on the

structural behavior of steel column base plate, Master's Thesis, Ajou University (in Korean).

- [3] Park, Y.M., Hwang, W.S., Yoon, T.Y., and Hwang, M.O (2005) A new base plate system using deformed reinforcing bars for concrete filled tubular column, *Steel & Composite Structures an International Journal*, Vol. 5 No. 5, pp.375-394.
- [4] Lee, D.Y. and Subhash C. God (2008) Exposed column-base plate connections bending about weak axis, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 8, No. 1, pp.11-27.
- [5] Dajin, L. (2006) *Design of circular base, plates*, Practice Periodical on Structural Design and Construction, pp.13-19.
- [6] Riyadh, H. and Wesley, T. (2008) Experimental behavior of circular concrete columns under reversed cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 22, pp. 684-693.
- [7] Zhu, M., Liu, J., Wang, Q., and Feng, X. (2010) Experimental research on square steel tubular columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete under axial load, *Engineering Structures*, 32, pp.2278-2286.
- [8] Hamizi, M., Ait-Aider, H., and Alliche, A. (2011) Finite element method for evaluation rising and slip of column-base plate for usual connections, *Strength of Materials*, Vol. 43, No. 6, pp.662-672.
- [9] 한국강구조학회(2006) 건설교통부 제정 강도표고 상세부 설계지침, 구미서관.
KSSC (2006) *Steel bridge design details*, Goomibook.
- [10] 대한토목학회, 교량설계핵심기술연구단(2010) 도로교설계 기준, 기문당.
KSCE, KBRC(2010) *Design code for highway bridges*, Kimmoondang (in Korean).
- [11] 한국콘크리트학회(2007) 콘크리트구조설계기준, 기문당.
KCI (2007) *Design code for concrete structure*, Kimmoondang (in Korean).

요 약 : 현재 강재교각 기초부의 설계에 적용되어지고 있는 형식은 기초 콘크리트 내부에 앵커프레임을 설치하여 교각부와 연결하는 형태로 설계 및 시공을 하고 있다. 이는 복잡한 설계와 시공으로 인하여 기초부의 크기가 커지고, 과대 설계되는 경향이 있다. 본 연구에서는 고성능강을 이용한 교각 기초부의 연결상세와 관련하여 새로운 형상을 제안하기 위하여 기존 설계기준에 의한 시험체와 고장력 앵커를 사용한 새로운 연결형상 시험체 등 총 3개의 시험체를 제작하여 실내 시험을 실시하였다. 이를 통하여 각 시험체의 성능을 비교 분석하여 연결형식에 따른 구조물의 거동특성을 분석하였다.

핵심 용어 : 강재교각 기초부, 앵커프레임, 고성능강, 고장력 앵커

