

# 프리캐스트 콘크리트 부유식 구조물의 모듈 접합부 강도

† 양인환 · 김경철\*

† 군산대학교 토목공학과 교수  
\* 군산대학교 토목공학과 석사과정

## Strength of Joint in Floating Structures Constructed with Precast Concrete Modules

† In-Hwan Yang · Kyung-Cheol Kim\*

† Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea  
\* Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

**요 약** : 프리캐스트 콘크리트 모듈 단위로 시공되는 플로팅 구조물의 거동은 콘크리트 모듈 접합부의 거동과 밀접한 연관성을 갖는다. 극한하중조건에서의 플로팅 구조물의 구조적 거동을 정확히 예측하기 위해서 모듈 접합부의 구조거동 실험연구를 수행하였다. 모듈 접합부 전단키의 전단거동, 전단강도 및 균열 패턴을 파악하였다. 실험결과는 전단키의 경사각도가 증가함에 따라 전단강도가 증가하는 것을 나타낸다. 또한, 구속응력이 증가함에 따라 전단키의 전단강도가 증가한다. 실험결과와 AASHTO 제안식에 의한 예측값을 비교하였으며, AASHTO 제안식은 실험값을 과소평가하고 있다.

**핵심용어** : 부유식 구조물, 모듈, 프리캐스트 콘크리트, 전단, 전단키

**Abstract** : The behavior of floating structures constructed with precast concrete modules is dependent of the behavior of joints between the concrete modules. To accurately predict the floating structure response under the ultimate loading, knowledge of joint behavior is essential. This study aims to investigate the structural behavior of concrete module joints under various configuration of joint and confining stress levels. The shear behavior, shear capacity and crack patterns of shear keys in concrete module have been studied. Test results indicated that the shear capacity of joints increased as shear key inclination increased. In addition, shear capacity of concrete module joint increased with the increase of confining stress levels. The test results were compared with the AASHTO design recommendations. The AASHTO design recommendations underestimated the shear strength of test specimens.

**Key words** : floating structure, module, precast concrete, shear, shear key

## 1. 서 론

항만 및 연안역 개발을 위해 부유식 구조물은 신해양공간 창출을 위한 대안으로서 해상레저시설, 마리나 시설, 인공섬 건설, 해상 저유시설, 해상 플랜트 등의 건설에 주로 적용된다. 해양 환경에서의 부유식 해상 구조물에 대한 연구개발은 세계 각국에서 이미 10여년 전부터 본격적으로 진행되었다(홍사영 등, 2001; Kaneko et al, 1993a, 1993b; Lanier et al., 2005; Tsinker, 1986). 일본에서는 국가적인 지원 아래 수행된 메가플로트 연구를 통해 확립된 기술을 바탕으로 2004년 하네다 공항확장계획에 초대형 플로팅 구조물을 적용하는 방안을 계획한 바 있다(나성원 등, 2009). 또한, 일본에서는 부유식 해상 구조물의 고도화 기술 및 국제표준화 연구를 수행하는 등 지속적인 연구개발에 매진하고 있다(홍사영 등, 2000).

부유식 구조물을 시공할 때 부유 구조체의 규모가 작은 경우에는 단일 구조물로 제작할 수 있지만, 규모가 큰 경우에는 특

정한 규모의 여러개의 모듈 구조물을 제작장에서 제작하고 해상에서 접합하여 하나의 단일 구조체로 완성한다. 근래 들어 이러한 부유식 모듈 구조물에 프리캐스트 콘크리트 모듈을 적용하는 경우가 증가하고 있다(Zaleski-Zamenhof et al., 1990; Rognas et al., 2001). 콘크리트 부유식 구조체를 시공한 후, 부유 구조체 위에 목적 구조물을 시공하는 개념이다.

미해군에서는 군사용 선박 접안을 위한 잔교 구조물로서, 콘크리트 모듈단위로 시공하는 하이브리드 모듈 잔교 구조물(modular hybrid pier, MHP)을 개발하여 활용하고 있다(Lanier et al, 2005). MHP는 고성능 콘크리트를 사용하여 프리캐스트 모듈 단위로 시공되었으며, 이를 위해 포스트텐서닝 공법이 적용되었다. 국내에서는 국토해양부 마리나 항만 계획에 따라 서남해안 주요 정온 수역에 마리나 시설이 계획되고 있다. 이러한 계획의 일환으로 수행된 함평 해양마리나 시설조성사업이 추진되고 있다. 함평 마리나 해양시설은 7개의 프리캐스트 콘크리트 모듈 구조체로 구성되었으며, 각 콘크리트 모듈은 제작장에서

† 교신저자 : 연희원, ihyang@kunsan.ac.kr 063)469-4752  
\* 연희원, popping6069@naver.com 063)351-6069

제작된 후 인양선으로 인양 후에 최종적으로 해상의 시공현장에서 모듈별로 조립되었다. 따라서, 부유식 해상구조물 건설을 위한 핵심기술로서 부유식 모듈 구조를 해상에서 안전하고 견고하게 결합할 수 있는 연결기법의 개발이 중요하다.

부유식 해상구조물을 프리캐스트 콘크리트 모듈 조립으로 계획할 때, 모듈별로 접합부가 존재하게 되며 각 접합부는 모듈 사이의 압축응력과 전단응력의 불연속면을 형성하게 된다. 따라서 각 모듈을 결합하여 완전한 구조물로서 역할을 수행하기 위해서는 접합부에서 강도가 확보되어야 하며 응력이 효과적으로 전달되어야 한다(이창홍 등, 2011; Annanmalai et al., 1990). 프리캐스트 콘크리트 박스 형태의 모듈에서 전단응력과 압축응력을 효과적으로 전달하기 위하여 접합부에 사다리꼴 전단키 설치에 유리하다(Rizkalla et al., 1989; Zhou et al., 2005). 전단키의 역학적 거동과 하중능력은 거동에 중요한 요인이 되며, 연결부의 거동 특성은 구조물 전체의 조립성과 구조적 기능에 중요한 영향을 미치는 요인이 된다(Buyukozturk et al. 1990; Kaneko and Mihashi, 1999; Turmo et al., 2006).

따라서, 이 연구에서는 프리캐스트 모듈 단위로 시공되는 부유식 구조물 접합부의 전단강도 특성을 파악하기 위해서 전단키를 갖는 연결부에 대하여 성능평가실험을 수행하였다. 전단키의 경사각도, 전단키의 돌출높이 및 횡방향 구속응력을 실험변수로 채택하여 구조부재 실험을 수행하였다. 실험변수별로 연결부 시편을 제작하였으며, 구조실험을 수행하여 연결부에서 하중-변형관계특성, 균열 및 파괴양상, 전단강도 특성을 파악하였다. 이 연구에서는 부재의 크기효과(size effect)는 고려되지 않았으며, 이 연구에서의 주요변수에 따른 실험결과를 토대로 추후 실규모(full-size)부재 실험연구를 수행하여 구조물의 더욱 실증적인 성능평가를 수행할 예정이다. 또한, 실험결과와 기존 제안식 (AASHTO, 1999; Rombach and Specker, 2004)에 의한 예측값의 비교연구를 수행하여 전단키의 전단강도를 평가할 수 있는 기존 예측식의 효용성을 평가하였다.

## 2. 프리캐스트 콘크리트 모듈 연결부

이 연구에서 대상으로 하는 프리캐스트 콘크리트 부유식 구조물에서의 모듈 접합부와 전단키의 형상 개념을 Fig. 1에 나타내었다. 프리캐스트 콘크리트 부유식 구조물 모듈 접합부의 응력은 전단키를 통해 전달된다. 전단키는 모듈과 일체로 제작된 사다리꼴의 전단키를 사용하며, 전단키의 형태는 단일 전단키와 다중 전단키로 구분할 수 있다(Fig. 2). 전단키는 연결부의 응력을 전달하는 역할과 모듈 조립시 모듈을 정확한 위치에 조립되도록 하는 역할을 한다. 또한, 모듈 접합 후 접합면의 수직 방향으로 프리스트레스를 도입하여 모듈 접합의 구조적 안정성을 확보할 수 있다.

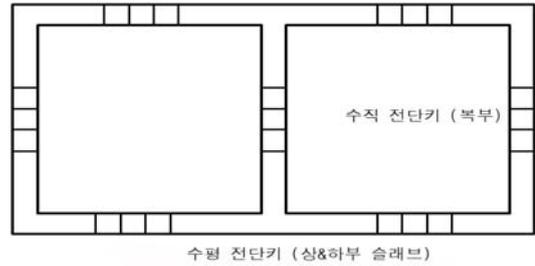


Fig. 1 Shear key in the section of precast concrete floating modules

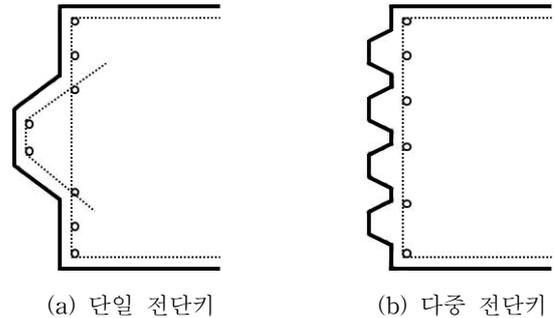


Fig. 2 Shape of shear key in the joints of concrete modules

## 3. 콘크리트 모듈 접합부의 강도 실험

### 3.1 실험변수

콘크리트 모듈 접합부는 모듈간의 일체화를 도모하기 위해 사다리꼴 형태의 전단키가 사용되며, 접합부의 구조거동 및 극한거동에는 전단키의 유무, 접합형태, 전단키의 형상 및 횡구속응력 등의 영향을 미친다. 이들 영향인자의 변화에 따른 부유식 콘크리트 구조체 모듈 접합부의 거동 특성 파악과 설계 및 시공을 위한 지침은 거의 전무한 상태이다. 따라서, 이 연구에서는 주요 실험변수를 전단키의 형상과 횡방향 구속응력 등으로 설정하여 모듈 접합 실험체를 제작하여 실험을 수행하였으며, 각 시편의 상세 내용을 Table 1에 나타내었다.

전단키의 형상은 전단키의 경사각도와 돌출높이에 따라 변화한다. 이러한 실험변수를 토대로 연결부의 전단강도, 균열 및 파괴거동 특성을 규명하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 전단키의 구체적인 형상은 Fig. 3에 나타내었다.

#### (1) 전단키의 경사각

전단키의 사다리꼴 형태는 경사각도에 따라 다른 형태를 나타낸다. 따라서, 전단키 저면과 전단키의 측면이 이루는 경사각도에 따른 전단거동의 특성을 연구하기 위하여 본 연구에서는 45°, 60°, 70°의 경사각을 가진 전단키에 대하여 실험을 수행하였다.

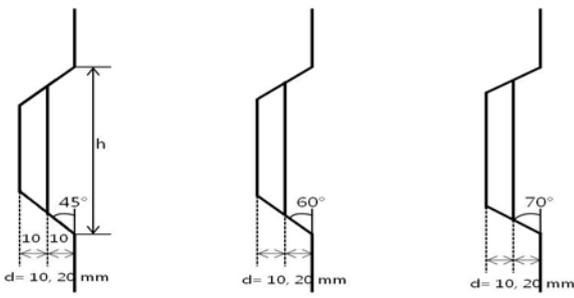
#### (2) 전단키의 돌출높이

본 연구에서는 전단키 저면 길이( $h$ )에 대한 전단키 돌출 높

이 ( $d$ ) 비의 영향을 파악하기 위하여  $d/h$ 를 1/7과 2/7로 하여 실험을 수행하였다. 전단키 저면의 길이는 70 mm로 모든 부재를 동일하게 적용하고, 전단키 돌출 높이를 각각 10 mm와 20 mm로 적용하였다.

(3) 횡방향 구속응력

프리캐스트 콘크리트 모듈 접합부의 일체화를 도모하고 콘크리트 구조체에 작용하는 상재하중에 의한 접합부에서의 인장응력을 감소시키기 위해 접합면에 프리스트레스를 도입할 수 있다. 이와 같이, 프리캐스트 모듈 구조체 조립 시에 프리스트레스를 도입할 때, 프리스트레스에 의해 단면에 압축응력이 작용하며, 이러한 압축응력은 접합 단면의 구속응력 역할을 한다. 이 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 연결부 단면에 수직으로 작용하는 구속응력의 변화에 따른 전단키의 전단거동 특성을 파악하기 위하여 횡방향 구속응력을 1, 2, 3 MPa로 변화하였다.



(a) Inclination(45°) (b) Inclination(60°) (c) Inclination(70°)  
Fig. 3 Geometry of shear key

3.2 실험시편 상세

부재의 전체적인 형상은 전체 높이 500 mm, 폭 300 mm, 두께 100 mm로 제작하였다. Fig. 4에서 시편 A에서 시편 B로에 응력이 전단키를 통해서만 전달되고 전단키의 충분한 변위능력을 확보하기 위하여 각 시편의 상부 및 하부에 각각 25 mm의 간격을 두었다. 실험에 사용된 전단키는 프리캐스트 콘크리트 연결부에서 단일 전단키를 모델링하여 실험 시편을 제작하였다. 실험시편의 접합면 길이는 170 mm, 전단키 저면의 길이는 70 mm 이다. 전단키의 돌출 높이( $d$ )와 경사각( $\alpha$ )은 실험변수로서, 돌출 높이를 10, 20 mm로 변화하였으며 경사각은 45°, 60° 및 70°로 변화하였다.

전단키에는 철근을 배근하지 않았으나 전단키 이외의 부분이 파괴되는 것을 방지하기 위하여 Fig. 4와 같이 철근을 시편의 상하에 배근하였다. 직경 10 mm (D10) 철근을 7자 형상으로 절곡하여 사용하였다. 철근의 형상은 긴 변의 길이 295 mm, 짧은 변의 길이 260 mm, 폭은 50 mm로 하였다.

또한, 부재를 제작할 때, 부재의 기본적인 강도특성을 측정하기 위하여 원주형 공시체를 제작하고 28일 양생을 실시하였다. 부재제작 후 28일 경과 후에 공시체에 대한 압축강도 시험과 전단키 부재실험을 수행하였다. 콘크리트의 압축강도는 64

MPa로 측정되었다.

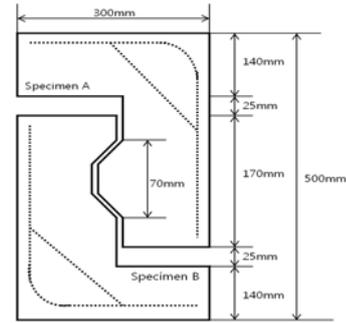


Fig. 4 Details of specimen

Table 1 Details of test specimens and test results

시편	전단키 경사각 (도)	전단키 돌출높이 (mm)	구속 응력 (MPa)	측정 최대하중 (kN)	AASHTO 제안식 (kN)	Rombach-Specker 제안식 (kN)
S45-H10-P1	45	10	1	34.3	70.6	69.9
S45-H10-P2	45	10	2	83.5	87.7	80.9
S45-H10-P3	45	10	3	114.1	104.7	92.0
S45-H20-P1	45	20	1	56.7	70.6	69.9
S45-H20-P2	45	20	2	101.1	87.7	80.9
S45-H20-P3	45	20	3	84.5	104.7	92.0
S60-H10-P1	60	10	1	75.5	70.6	69.9
S60-H10-P2	60	10	2	105.0	87.7	80.9
S60-H10-P3	60	10	3	130.9	104.7	92.0
S60-H20-P1	60	20	1	54.4	70.6	69.9
S60-H20-P2	60	20	2	113.0	87.7	80.9
S60-H20-P3	60	20	3	140.1	104.7	92.0
S70-H10-P1	70	10	1	86.3	70.6	69.9
S70-H10-P2	70	10	2	107.9	87.7	80.9
S70-H10-P3	70	10	3	135.0	104.7	92.0
S70-H20-P1	70	20	1	86.5	70.6	69.9
S70-H20-P3	70	20	3	111.8	104.7	92.0

3.3 실험방법 및 측정

수직하중은 전단키의 접합면 중심선에 재하되도록 하여, 가능한 가력하중이 전단키 접합면에 전달하중으로 전달되도록 하였다. 횡하중이 가력될 때 하중에 견딜 수 있도록 강재의 반력 프레임을 설치하였다. 또한, 반력 프레임과 시편 사이에 고무판을 설치하여, 횡하중이 반력 프레임에 끌고루 분포하여 전달될 수 있도록 하였다(Fig. 5).

부재의 가력 시스템은 용량 300 kN 수직 액츄에이터와 용량 150 kN의 수평 액츄에이터로 구성된다. 수직 액츄에이터는 전단키의 접합면에 전달하중을 가력하기 위해서 적용하였고, 수평 액츄에이터는 전단키 접합면의 구속응력을 적용하기 위하여

사용하였다. 하중은 수직 액츄에이터는 변위제어조건을 적용하였고, 수평 액츄에이터는 하중제어조건으로 적용하였다. 수평 액츄에이터의 재하하중은 구속응력 1, 2, 3 MPa에 대응하도록 하였다. 일정한 구속응력 조건에서 부재가 파괴될 때까지 수직 하중을 재하하였다. 수직하중 재하 속도는 2 mm/min 으로 재하하였다(Fig. 6).

수직변위를 측정하기 위하여 부재의 한쪽면에 변위계를 설치하여 수직변위를 측정하였다. 부재 또 다른 한쪽면에 LVDT 2개를 설치하여 상부 부재와 하부 부재간의 상대 처짐량을 측정하였다(Fig. 7).

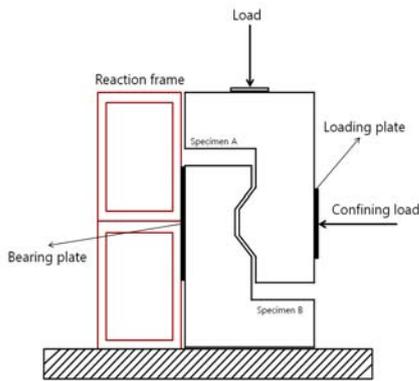


Fig. 5 Schematic test setup



Fig. 6 Actual test setup



Fig. 7 Detail of displacement measurement

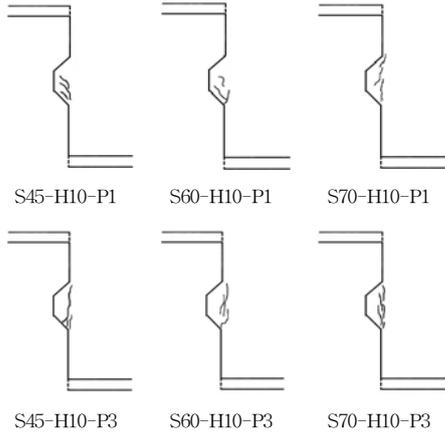
## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 균열 및 파괴거동 특성

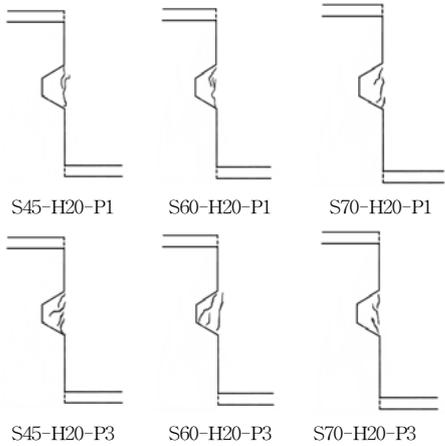
Fig. 8에 시편의 파괴형상을 나타내었으며, 연결부의 균열 및 파괴거동은 전단키의 형상에 따른 차이를 나타낸다. 일반적으로 초기균열은 전단키의 하부와 복부중앙에서 사인장균열이 발생한다. 또한 횡방향 응력이 작은 경우 일정한 하중이 가력된 후 초기 균열이 발생되며, 전단키 하부에서 지압에 의한 파괴가 다수를 차지한다. 전단키 하부에서 초기균열이 발생하며 균열은 전단키 부근을 따라 진전되는 형상을 나타낸다. 때로는 초기 균열이 복부 상단에서 발생하여 균열 확대에 의하여 파괴가 발생하기도 하였다.

돌출높이가 10 mm 인 경우 접합면 아래 부분에서 초기에 사인장 균열이 발생하며, 가력하중의 증가에 따라 지압에 의한 파괴로 진전되는 것을 관찰할 수 있었다. 수직하중이 극한 상태에 도달하게 되면서 최종적으로 전단절단파괴(shear-off failure)가 발생하였다. 전단키 돌출높이가 10 mm인 부재 S70-H10-P1의 경우, 재하하중이 65.2 kN일 때 전단키의 하단에서 초기균열이 발생하였으며, 초기균열 폭은 0.15 mm로 관찰되었다. 초기균열 발생후에도 하중은 최대하중까지 증가한다. 이는 초기균열 발생 이후 이음부에서 전단키의 맞물림이 재배열되고 하중분담 능력이 다시 증가하는 현상으로 판단된다. 최대하중은 86.3 kN이며, 최대하중 단계에서의 균열폭은 0.50 mm이다(Fig. 9(a)). S45-H10 시리즈와 S60-H10 시리즈는 위와 같이 균열과 파괴거동이 발생하였으나, S70-H10 시리즈는 접합면 윗부분에서 균열이 발생하기도 하였다. 윗부분에서 초기에 균열이 일부 발생하였으며, 극한 상태에 도달하면서 지압파괴로 인해 전단키 부분에서 전단절단파괴와 동시에 Fig. 5에서의 시편A(Specimen A)와 시편B(Specimen B)의 접합면이 탈락되는 형상을 관찰할 수 있었다.

돌출높이가 20 mm인 시편에서는 가력 초기에 접합면 중앙부분에서 다수의 사인장 균열이 발생하였다. 수직하중이 극한 상태에 도달하면서 전단키 접합면에서 전단절단 파괴가 발생하였다. 전단키 돌출높이가 20 mm인 부재 S60-H20-P1의 경우, 재하하중이 47.8 kN일 때 전단키의 하단에서 초기균열이 발생하였으며, 초기균열 폭은 0.10 mm이다. 초기균열 발생후에도 하중은 최대하중까지 증가한다. 이는 초기균열 발생 이후 이음부에서 전단키의 맞물림이 재배열되고 하중분담 능력이 다시 증가하는 현상으로 판단된다. 최대하중은 54.4 kN이며, 최대하중 단계에서의 균열폭은 0.45 mm이다(Fig. 9(b)). 돌출높이가 10 mm인 실험체보다 돌출높이가 20 mm 인 실험체에서 전단키가 부담하는 하중이 더 높은 것으로 추정되었다. 돌출높이가 작은 경우에는 접합할 때 전단키가 부담하는 하중이 작게 되므로 전단키의 지압 파괴와 함께 전단키가 탈락되는 것으로 사료된다.

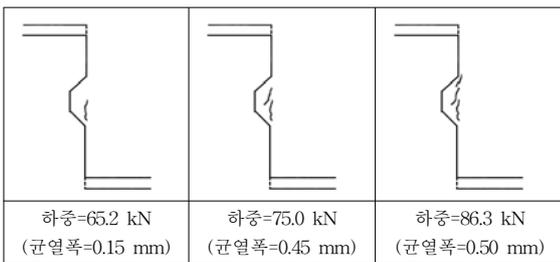


(a) Specimens with 10 mm depth of shear key

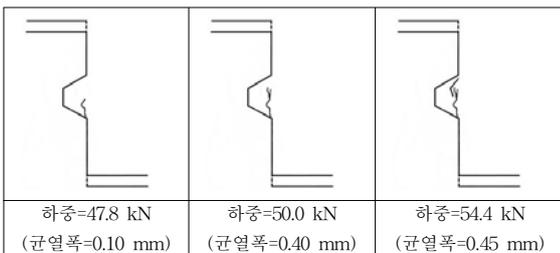


(b) Specimens with 20 mm depth of shear key

Fig. 8 Crack patterns



(a) S70-H10-P1



(b) S60-H20-P1

Fig. 9 Crack propagation with increase of loads

#### 4.2 하중-변위 관계 특성

수직하중에 따른 콘크리트 접합부의 하중-수직변위 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 실험 전에 부재 S70-H20-P2는 파손되어 실험결과를 획득하지 못하였으며, Fig. 9에 S70-H20 시리즈의 하중-변위관계 곡선을 나타내지 않았다. 하중-변위 관계곡선은 초기균열상태까지 선형으로 증가한다. 초기균열후 곡선은 다소 완만하게 증가한다. 최대하중 도달후 곡선은 하락하는 취성특성을 나타낸다. 또한, 최대하중 이후 큰 수직변위가 발생하였다. 이는 수직하중이 접합부에서의 두 시편이 횡방향으로 변위가 발생한 상태에서 전단파괴와 함께 수직변위가 급격하게 발생하기 때문으로 판단된다.

대표적으로 부재 S45-H10-P2의 하중과 변위관계 특성으로 써, 재하하중이 64.7 kN일 때 초기균열이 발생하였고 이때의 수직변위는 3.03 mm로 관찰되었다. 초기균열 발생후 하중-변위 관계 곡선은 최대하중까지 완만하게 증가하며, 최대하중 일때의 수직변위는 9.93 mm이다. 또한, 부재 S60-H10-P2의 초기균열상태에서의 수직변위는 3.32 mm이다. 초기균열 이후에 하중은 거의 일정한 상태에서 수직변위는 7.80 mm까지 증가하였다. 이후 하중-수직변위관계 곡선은 최대하중까지 완만하게 증가하며, 최대하중상태에서의 수직변위는 19.28 mm이다.

횡방향 구속응력이 큰 경우에 비해 작은 경우는 최대하중 이후 큰 수직변위가 발생하는 경향이 크다. 이는 횡방향 구속응력이 작은 경우, 수직하중이 증가함에 따라 접합부에서 시편 양쪽이 횡방향으로 벌어지기가 쉽기 때문에 수직변위가 더욱 크게 발생한다고 판단된다.

#### 4.3 강도특성

실험결과로서 부재별 최대하중 즉, 부재 접합부의 전단강도를 Table 1에 나타내었다. 횡방향 구속응력 크기에 따른 전단강도를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 횡방향구속응력이 1, 2, 3 MPa 로 증가함에 따라 최대전단하중은 증가한다. 이 실험연구에서의 횡방향 구속응력은 플로팅 콘크리트 구조모듈에 도입되는 프리스트레싱 효과를 묘사하므로 프리스트레싱 효과는 전단강도 증가에 매우 효과적임을 나타낸다. 구체적으로 전단기 경사각이 60°이고 전단기 돌출높이가 10 mm 인 경우(S60-H10 시리즈), 횡방향 구속응력이 1, 2, 3 MPa 로 변화함에 따라 전단강도는 75.5, 105.0, 130.9 kN으로 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, 전단기 경사각이 70°이고 전단기 돌출높이가 10 mm 인 경우(S70-H10 시리즈), 횡방향 구속응력이 1, 2, 3 MPa 로 변화함에 따라 전단강도는 86.3, 107.9, 135.0 kN으로 증가한다.

전단기의 경사각도에 의한 전단강도를 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 전단기 경사각이 45°, 60°, 70°로 증가함에 따라 최대전단하중은 증가한다. 구체적으로 전단기 돌출높이가 10 mm 이고 횡방향구속응력이 1 MPa 인 경우(H10-P1 시리즈), 전단기 경사각이 45°, 60°, 70°로 증가함에 따라 전단강도는 34.3, 75.5, 86.3 kN로 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, 전단기 돌출높이가 10 mm 이고 횡방향 구속응력이 2 MPa 인 경우

프리캐스트 콘크리트 부유식 구조물의 모듈 접합부 강도

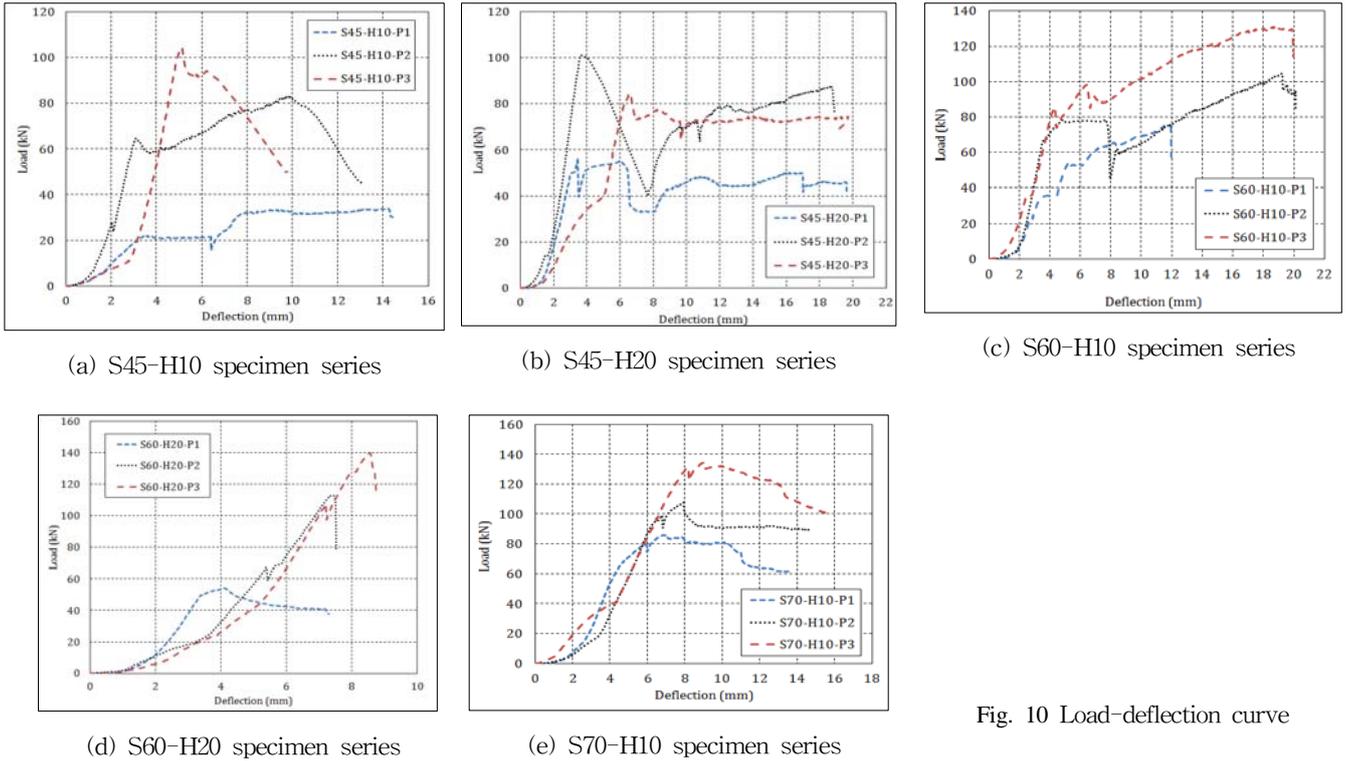
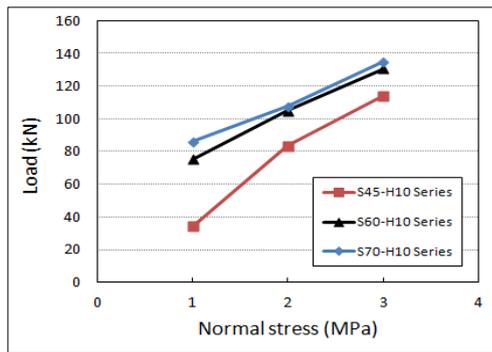
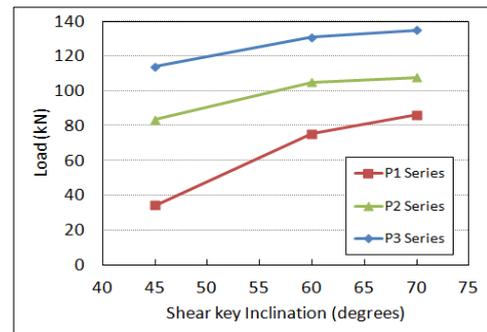


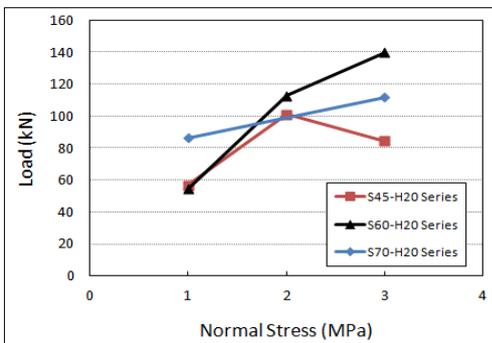
Fig. 10 Load-deflection curve



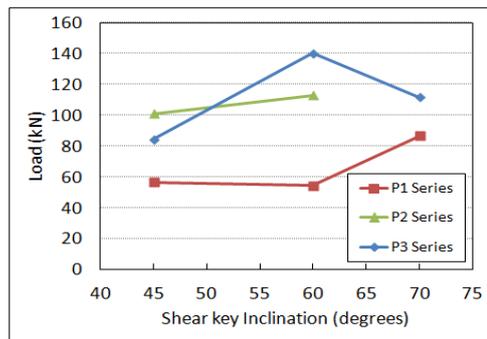
(a) Specimen with 10 mm depth of shear key



(a) Specimen with 10 mm depth of shear key



(b) Specimen with 20 mm depth of shear key



(b) Specimen with 20 mm of shear key depth

Fig. 11 Shear strength at various confining stress levels

Fig. 12 Shear strength at various inclination of shear key

(H10-P2 시리즈), 전단기 경사각 증가에 따라 전단강도는 83.5, 105.0, 107.9 kN로 증가한다. 전단기 경사각이 클 때, 두 시편

접합부에서의 미끌어짐 현상은 감소하며, 이에 따라 전단강도가 증가한다고 판단된다.

전단키 돌출높이에 따른 전단강도를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. S45-P1 시리즈와 S70-P1 시리즈의 경우에 전단키 돌출높이( $d$ )가 10 mm에서 20 mm로 변화함에 따라 전단강도의 뚜렷한 증가는 관찰되지 않았다. 반면에, S60-P1 시리즈의 경우, 전단키 돌출높이 증가함에 따라 전단강도는 감소하였다. 이러한 부재는 전단키의 돌출높이가 커질수록 전단키 제작시의 시공오차(imperfection effect)를 유발했기 때문에 판단된다.

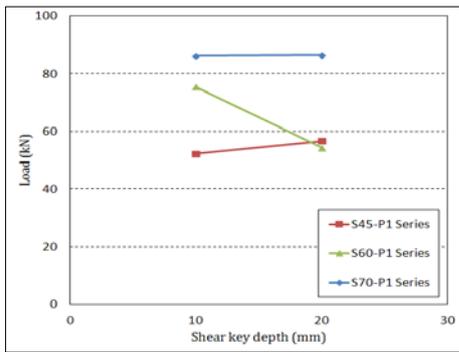


Fig. 13 Shear strength at various shear key depth ( $d$ )

#### 4.4 실험값과 예측값의 비교

실험을 통하여 측정된 연결부의 전단강도결과를 AASHTO (1999) 설계기준에서의 제안식과 Rombach 등 (2004)의 제안식에 의한 예측값을 비교분석하였다.

AASHTO 설계기준(1999)에서의 콘크리트 모듈 접합부의 전단강도 평가식은 다음과 같다.

$$V_j = A_K \sqrt{6.792 \times 10^{-3} f'_c} (12 + 2.466 \sigma_n) + 0.6 A_{sm} \sigma_n \quad (\text{MN}) \quad (1)$$

- 여기서,  $A_K$  : 전단키의 파괴면적 ( $m^2$ )
- $A_{sm}$  : 전단키 평면 접촉부 면적 ( $m^2$ )
- $A_{joint}$  :  $A_K + A_{sm}$
- $f'_c$  : 콘크리트압축강도 (MPa)
- $\sigma_n$  : 접합면의 수직응력 (MPa)

또한, Rombach 등(2004)의 콘크리트 모듈 접합부의 전단강도 평가식은 다음과 같다.

$$V_j = 0.14 f'_c A_K + 0.65 \sigma_n A_{joint} \quad (\text{MN}) \quad (2)$$

- 여기서,  $A_K$  : 전단키의 파괴면적 ( $m^2$ )
- $A_{joint}$  :  $A_K + A_{sm}$
- $f'_c$  : 콘크리트압축강도 (MPa)
- $\sigma_n$  : 접합면의 수직응력 (MPa)

각 제안식에 의한 모듈 접합부의 전단강도 예측결과를 Table 1에 나타내었다. AASHTO 제안식에 의한 예측값과 실험값을

비교한 결과, 예측값은 전반적으로 실험값을 과소평가하고 있다. 또한, Rombach와 Specker 제안식에 의한 전단강도 예측값은 실험값을 과소평가하고 있으며, 이들의 제안식에 의한 예측값은 AASHTO 제안식에 의한 예측값보다 실험값을 더욱 과소평가하고 있다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 콘크리트 부유식 구조물에 적용하기 위하여 콘크리트 모듈 접합부의 강도평가실험을 수행하였으며, 콘크리트 모듈 접합부에서의 하중-변형특성, 균열과 파괴형상 및 전단강도 특성 등을 파악하고 전단강도 측정값과 예측값을 비교·분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 전단키의 초기균열은 전단키 하부에서 발생하여 상부쪽으로 진행되는 경향을 보인다. 파괴형상은 전단면키의 인장균열에 의한 전단절단파괴가 대부분이고 횡방향 응력이 작은 경우에는 전단키 하부에서 지압에 의한 파괴가 발생하기도 하였다.
2. 횡방향 구속응력이 1 MPa에서 3 MPa로 증가함에 따라 프리캐스트 콘크리트 모듈 접합부의 전단강도는 증가하는 것으로 나타나며, 이는 플로팅 콘크리트 구조모듈에 도입되는 프리스트레싱 효과는 전단강도 증가에 매우 효과적임을 의미한다.
3. 전단키 경사각이 45°에서 70°로 변화함에 따라 접합부의 전단강도는 증가하는 것으로 나타나며, 이는 두 시편 접합부에서의 미끌어짐이 감소하여 전단강도가 증가하기 때문이다.
4. 전단키의 돌출높이가 10 mm에서 20 mm로 변화함에 따라 접합부 전단극한강도의 뚜렷한 증가는 관찰되지 않았으며, 이는 전단키 돌출높이가 커질수록 전단키 제작시의 시공오차를 유발했기 때문에 판단된다.
5. AASHTO 제안식과 Rombach와 Specker 제안식에 의한 예측값은 실험값을 과소평가하고 있으며, 기존 예측식이 안전측임을 나타낸다. 또한, Rombach와 Specker의 예측값은 AASHTO 예측값보다 실험값을 더욱 과소평가하는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 논문은 2010년 국토해양부 기술연구개발의 지역기술혁신사업(과제번호: 10지역기술혁신B01)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 나성원, 송명관 (2009), “초대형 부유식 해상구조물설계를 위한 유탄성해석 소프트웨어 적용”, 한국전산구조공학회지, 제22권, 제5호, pp.78-85.
- [2] 이창홍, 김영진, 진원중, 최은석 (2011) “초고성능 프리캐스

- 트 세그멘탈 PC교량 접합부에 대한 실험 연구”, 한국콘크리트학회논문집, 제23권, 제2호, pp.235-244.
- [3] 홍사영 외(2000), 초대형 부유식 해상구조물 기술개발, 한국해양연구소.
- [4] 홍사영, 정태영, 신현경(2001) “초대형 부유식 해상구조물의 기술현황”, 대한조선학회지, 제38권, 제4호, pp.29-38.
- [5] AASHTO, (1999) “Guide Specifications for the Design and Construction of Segmental Concrete Bridges,” Second Edition, pp.3-118.
- [6] Annamalai, G., and Robert C. Brown, Jr.(1990) “Shear-Transfer Behavior of Post-Tensioned Grouted Shear-key Connections in Precast Concrete-Framed Structures”, ACI Structural Journal, Vol. 87, No. 1, pp.53-59
- [7] Buyukozturk, O., Bakhoun, M., and Beattie, S. M., (1990) “Shear Behavior of Joints in Precast Concrete Segmental Bridges”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 12, pp.3380-3401.
- [8] Kaneko, Y. and Mihashi, H.(1999), “Analytical Study on the Cracking Transition of Concrete Shear Key”, Materials and Structures, Vol. 32, No. 217, pp.196-202.
- [9] Kaneko, Y., Connor, J. J., Triantafillou, T. C. and Leung, C. K.(1993a), “Fracture Mechanics Approach for Failure of Concrete Shear Key. I: Theory”, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 119, pp.681-700.
- [10] Kaneko, Y., Connor, J. J., Triantafillou, T. C. and Leung, C. K.(1993b), “Fracture Mechanics Approach for Failure of Concrete Shear Key. II: Verification”, Journal of Engineering Mechanics Vol. 119, pp.701-719.
- [11] Lanier MW, Wernul M, Easley R and Springston PS (2005) “New Technologies Proven in Precast Concrete Modular Floating Pier for U.S. Navy”, PCI Journal, Jul.-Aug., pp.76-99.
- [12] Rizkalla, Sami H., serrette, Reynaud L., Heuvel, J. Scott., and Attiogbe Emmanuel K.(1989), “Multiple Shear Key Connections for Precast Shear Wall Panels”, PCI Journal, pp.104-120.
- [13] Rognas, G., Xu, J., Lindseth, S. and Rosendahl, F. (2001) “Mobile Offshore Base Concepts. Concrete Hull and Steel Topsides”, Marine Structures, Vol. 14, pp.5-23.
- [14] Rombach, G.A., and Specker, A.,(2004) “Segmentbrücken,” Beton-Kalender, Teil 1, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, Germany, pp.177-211. (in German)
- [15] Tsinker, G.P. (1986) Floating Ports: Design and Construction Practices.
- [16] Turmo, J., Ramos, G. and Aparicio, A. C.(2006), “Shear Strength of Dry Joints of Concrete Panels with and without Steel Fibers Application to Precast Segmental Bridges”, Engineering Structures, Vol. 28, pp.23-33.
- [17] Zaleski-Zamenhof, L.C., Gerwick, B.C., Hellesland, J. Matsuishi, M. and Zhang, X. (1990) “Concrete Marine Structures: A State-of-the-Art Review, Marine Structures, Vol. 3, pp.199-235.
- [18] Zhou, X., Mickleborough, N. and Li Z.(2005), “Shear Strength of Joints in Precast Concrete Segmental Bridges”, ACI Structural Journal, Vol. 102, No. 1, pp.3-11.

---

원고접수일 : 2011년 12월 12일  
 심사완료일 : 2012년 4월 12일  
 원고채택일 : 2012년 4월 12일