전단을 받는 부유식 콘크리트 구조물 접합부의 강도 평가

† 양인환 · 김경철*

† 군산대학교 토목공학과 교수, * 군산대학교 토목공학과 석사과정

Strength Estimation of Joints in Floating Concrete Structures Subjected to Shear

† 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 : 이 연구에서는 전단하중을 받는 부유식 콘크리트 구조물 모듈 접합부의 구조거동 실험연구를 수행하였다. 모듈 접합부 전단키의 균열 양상, 전단거동 및 전단강도를 파악하였다. 전단강도의 영향을 파악하기 위해 전단키의 경사각도, 횡방향 구속응력 및 콘크리트의 압축강도 등을 실험변수로 고려하였다. 전단키의 경사각도가 증가함에 따라 접합부의 전단강도가 증가하였다. 또한, 구속응력이 증가함에 따라 전단키의 전단강도가 증가하였다. 실험변수에 따른 전단거동 실험결과를 토대로 접합부의 전단강도 평가식을 제안하였으며, 제안식에 의한 전단강도 예측값은 실험값에 근접하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 부유식 콘크리트, 모듈, 전단키, 전단강도, 균열, 횡방향 구속응력

Abstract : This study explores the structural behavior of module joints in floating concrete structures subjected to shear. Crack patterns, shear behavior and shear capacity of shear keys in joints of concrete module were investigated. Test parameters included shear key shape, or inclination of shear keys, confining stress levels and compressive strength of concrete. Test results showed that shear strength of joints increased as shear key inclination increased. Test results also showed that shear strength of concrete module joints increased with the increase of confining stress levels. The equation for predicting shear strength of joints was suggested, which was based on the test results. Shear strength prediction by using the equation suggested in this study showed good agreement with test results.

Key words : floating concrete, module, shear key, shear strength, crack, confining stress

1. 서 론

최근 들어 부유식 구조물(floating structure)을 이용한 해상 공간 창출에 대한 관심이 증대하기 시작하면서 부유식 구조물 건설기술 개발에 대한 연구가 증가하고 있다(Na and Song, 2009; Hong et al., 2001; Zaleski-Zamenhof et al., 1990). 대부분의 부유식 구조물의 제작 및 시공은 조선산업 분야를 중심으로 기술개발이 주로 이루어져 왔으며, 대부분 강재(steel)를 이용한 부유식 구조물 개발 연구로 진행되어 왔다. 강재 구조물은 제작 및 시공기간을 단축할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면에 상대적으로 가벼운 중량으로 인해 극심한 파랑하중 조건에서의 구조적 안정성 저하의 우려 때문에 부유식 해상구조

물에서의 적용과 실용화에 제한을 받는 경우도 있다. 이러한 제한을 극복하기 위해 해상 부유식 구조물을 콘크리트로 시공하기 위한 기술개발 연구가 관심을 받고 있다(Yang and Kim., 2012; Rognas et al., 2001; Starr, P. and Wainwright, D. A., 1996).

실제로, 미해군에서는 군사용 선박 접안을 위한 잔교 구조물을 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 모듈 단위로 시공하는 하이브리드 모듈 잔교 구조물(modular hybrid pier, MHP)을 개발하여 활용하고 있으며(Lanier et al., 2005), 국내에서도 국토해양부 마리아나 항만 계획에 따라 수행된 함평 해양마리아나 시설이 7개의 프리캐스트 콘크리트 모듈 구조체로 시공되었다.

† 교신저자 : 연희원, ihyang@kunsan.ac.kr, 063)469-4752

* 연희원, popping6069@naver.com 063)351-6069

(주) 이 논문은 "프리캐스트 콘크리트 접합부의 강도특성실험"란 제목으로 "2011 한국항해항만학회 추계논문집(해운대센텀호텔 2011.11.17.-19, pp. 180-182)"에 발표되었음.

대부분의 콘크리트 부유식 구조물은 가설현장 근처의 공장 또는 별도의 제작장에서 모듈(module) 단위로 제작하고, 제작된 모듈 부재를 가설현장으로 이동한 후 가설장비를 이용하여 각 모듈부재를 조립하여 목적 구조물을 완성하는 시공절차를 적용하는 것으로 계획된다. 이때, 각 모듈 부재를 프리캐스트 콘크리트로 제작하고 프리스트레스를 도입하는 것이 콘크리트 구조물의 일체화 도모 및 시공품질 향상에 유리하다. 이와 같이 부유식 해상구조물을 프리캐스트 콘크리트 모듈 단위로 계획할 때 모듈 사이에 접합부가 존재하게 되고, 접합부에서는 모듈 사이의 원활한 응력 전달 및 구조적 안전성이 확보되도록 설계되어야 한다(Annamalai et al., 1990; Koseki, K. and Breen, J. E., 1983). 또한, 접합부 전단기는 역학적 거동과 강도에 중요한 영향 요인이 되며, 접합부의 거동 특성은 구조물 전체의 조립성과 구조적 기능에 중요한 영향을 미치는 요인이 된다(Lee et al., 2011; Buyukorzturk et al., 1990; Kaneko et al., 1993a, 1993b; Tsinker, 1986; Turmo et al., 2006). Yang and Kim(2012)은 전단기 하면과 돌출 높이의 비(d/h)가 0.30 이하인 부유식 콘크리트 모듈 부재 접합부의 강도특성 연구를 수행하였으며, Han et al.(2006)은 교량구조물에 적용하기 위한 분절 부재의 전단실험연구를 수행한 바 있다.

따라서, 이 연구에서는 전단기의 형상에 따른 접합부의 전단강도 특성을 파악하기 위해서 전단하중을 받는 접합부에 대하여 전단 성능평가 실험연구를 수행하였다. 전단기의 형상 변화에 의한 접합부 전단거동을 파악하기 위하여 사다리꼴 전단기를 사용하였으며, 실험변수로서 전단기의 형상 즉, 전단기 경사각도와 횡방향 구속응력 및 콘크리트 강도를 실험변수로 고려하였다. 실험변수를 반영한 콘크리트 접합부 실험시편을 제작하여, 구조실험을 수행하여 접합부에서의 하중-변위 관계 특성, 균열, 파괴양상 및 전단 강도 특성을 분석하였다. 또한, 실험 결과를 토대로 프리캐스트 콘크리트 모듈 접합부의 전단 강도를 평가하기 위한 식을 제안하였다.

2. 프리캐스트 콘크리트 부유식 모듈 구조

이 연구에서 대상으로 하는 프리캐스트 콘크리트 모듈 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서의 콘크리트 모듈 구조 위에 설계자가 원하는 목적 구조물 즉, 구체적인 상부 구조물을 설계할 수 있다. 콘크리트 모듈 구조는 상부슬래브, 하부슬래브 및 벽체로 구성되는 박스 형태로 구성되며, 상부 구조의 하중 재하 조건에 따라 박스 내부에 추가의 격벽 구조물을 설계할 수 있다. 상부슬래브와 하부슬래브 접합부의 응력은 수평 전단기를 통해 전달되며, 벽체 접합부의 응력은 수직 전단기를 통해 전달된다. 전단기의 형상은 모듈과 일체로 제작된 사다리꼴 형태를 적용한다. 전단기는 접합부의 응력을 전달하는 역할과 모듈 조립시 모듈을 정확한 위치에 조립되도록 하는 가이드 역할을 한다. 또한, 콘크리트 모듈을 연결할 때 프리스

트레스를 도입하여 모듈의 구조적 안정성을 확보한다.

(a) Schematic precast concrete floating structure

(b) Section of concrete floating structure

Fig. 1 Concrete floating structure

3. 콘크리트 모듈 접합부의 구조성능 실험

3.1 실험변수

콘크리트 모듈 접합부는 모듈간의 일체화를 도모하기 위해 사다리꼴 형태의 전단기가 사용되며, 접합부의 구조거동 및 극한거동에는 전단기의 유무, 접합형태, 전단기의 형상 및 횡방향 구속 응력, 콘크리트 강도등의 영향을 미친다. 이들 영향인자의 변화에 따른 부유식 콘크리트 구조체 모듈 접합부의 거동 특성 파악과 설계 및 시공을 위한 지침은 매우 부족한 상황이다. 따라서, 이 연구에서는 주요 실험변수를 전단기의 형상과 횡방향 구속응력 등으로 설정하여 모듈 접합부 실험 시편을 제작하여 실험을 수행하였으며, 각 시편의 상세 내용을 Table 1에 나타내었다.

전단기의 형상은 전단기의 경사각도와 돌출높이에 따라 변화한다. 이를 실험변수로 고려하여 접합부의 전단강도, 균열 및 파괴거동 특성을 규명하기 위한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 전단기의 구체적인 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 실험변수

로써 전단키의 경사각도, 횡방향 구속응력의 크기 및 콘크리트 강도를 고려하였다. Yang and Kim(2012)은 전단키 하면(h)에 대한 전단키 돌출 높이(d)의 비 (d/h)가 0.30이하인 접합부의 구조거동 특성을 연구하였다. 본 연구에서는 d/h 비를 0.4로 설정하였으며, 이에 따라 전단키 하면의 길이는 70 mm 이고, 전단키 돌출 높이는 30 mm로 적용하였다. 또한, 전단키의 사다리꼴 형상은 경사각도에 따라 다른 형상을 나타내므로 전단키 하면과 측면이 이루는 경사각도에 따른 전단거동 특성을 파악하기 위하여 전단키의 경사각도는 45°, 60°, 70°로 설정하여 실험을 수행하였다.

프리캐스트 모듈 구조체 조립 시에 프리스트레스를 도입할 때 프리스트레스에 의해 콘크리트 단면에 압축응력이 작용하며, 이러한 압축응력은 접합 단면의 구속응력 역할을 한다. 이 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 접합부 단면에 수직으로 작용하는 구속응력의 변화에 따른 전단키의 전단거동 특성을 파악하기 위하여 횡방향 구속응력을 1, 2, 3 MPa로 변화하였다. 또한, 콘크리트 강도를 24, 40 MPa로 구분하였다.

(a) Inclination(45°) (b) Inclination(60°) (c) Inclination(70°)
Fig. 2 Geometry of shear key

3.2 실험시편 상세

부재의 전체 높이는 500 mm, 폭 300 mm, 두께 100 mm로 제작하였다. Fig. 3에서 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 접합부에서 단일 전단키를 모델링하여 실험 시편을 제작하였다. 실험시편의 접합면 길이는 170 mm, 전단키 하면의 길이(h)는 70 mm 이다. 전단키의 돌출 높이(d)는 30 mm로 설정하였으며 경사각도는 45°, 60° 및 70°로 변화하였다.

전단키에는 철근을 배근하지 않았으나 전단키 이외의 부분이 파괴되는 것을 방지하기 위하여 Fig. 3과 같이 철근을 시편의 상하에 배근하였다. 직경 10 mm (D10) 철근을 ㄱ자 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 측정

하기 위하여 원주형 공시체를 제작하고 28일 양생을 실시하였다. 부재제작 후 28일 경과 후에 공시체에 대한 압축강도 시험과 전단키 부재실험을 수행하였다. 콘크리트의 압축강도는 24, 40 MPa로 측정되었다.

Fig. 3 Details of specimen

Table 1 Details of test specimens and results

시편	전단키 경사각 (도)	구속 응력 (MPa)	콘크리트 강도 (MPa)	전단강도 측정값 (kN)	AASHTO 제안식 (kN)	연구 제안식 (kN)
S45-P1-F24	45	1	24	48.8	46.9	45.2
S45-P2-F24	45	2	24	98.3	59.9	55.4
S45-P3-F24	45	3	24	86.3	72.8	65.6
S60-P1-F24	60	1	24	58.5	46.9	49.0
S60-P2-F24	60	2	24	41.2	59.9	59.2
S60-P3-F24	60	3	24	88.9	72.8	69.4
S70-P1-F24	70	1	24	66.7	46.9	50.7
S70-P2-F24	70	2	24	76.9	59.9	60.9
S70-P3-F24	70	3	24	79.8	72.8	71.1
S45-P1-F40	45	1	40	68.5	58.8	68.6
S45-P2-F40	45	2	40	84.0	73.8	78.8
S45-P3-F40	45	3	40	76.2	88.8	89.0
S60-P1-F40	60	1	40	59.5	58.8	74.8
S60-P2-F40	60	2	40	86.3	73.8	85.0
S60-P3-F40	60	3	40	108.8	88.8	95.2
S70-P1-F40	70	1	40	60.7	58.8	77.7
S70-P3-F40	70	3	40	115.1	88.8	98.1

3.3 실험 및 측정 기법

수직하중은 전단키의 접합면 중심선에 재하하여, 실험 시편의 전단키 접합면에 순수 전단을 받는 조건이 되도록 하였다. 횡방향 하중이 가력될 때 하중에 견딜 수 있도록 강재의 반력 프레임을 설치하였다. 또한, 반력 프레임과 시편 사이에 고무판을 설치하여, 횡방향 하중이 반력 프레임에 골고루 분포하여 전달될 수 있도록 하였다(Fig. 4).

부재의 가력 시스템은 용량 300 kN 수직 액츄에이터와 용량 150 kN의 수평 액츄에이터로 구성된다. 수직 액츄에이터

는 전단기의 접합면에 전단하중을 가력하기 위해서 적용하였고, 수평 액츄에이터는 전단기 접합면의 횡방향 구속응력을 적용하기 위하여 사용하였다. 하중은 수직 액츄에이터는 변위 제어조건을 적용하였고, 수평 액츄에이터는 하중제어조건으로 적용하였다. 수평 액츄에이터의 재하하중은 횡방향 구속응력 1, 2, 3 MPa에 대응하도록 하였다. 일정한 횡방향 구속응력 조건에서 부재가 파괴될 때까지 수직하중을 재하하였다. 수직 하중 재하 속도는 2 mm/min 으로 재하하였다(Fig. 6).

수직변위를 측정하기 위하여 부재의 한쪽면에 변위계를 설치하여 수직변위를 측정하였다(Fig. 5). 부재 또 다른 한쪽면에 LVDT 2개를 설치하여 상부 부재와 하부 부재간의 상대 처짐량을 측정하였다. 또한 접합부 표면의 콘크리트 변형률 상태를 파악하기 위해 부재의 표면에 콘크리트 게이지를 0°, 45°, 90°로 각각 부착하였다.

Fig. 4 Schematic test setup

Fig. 5 Detail of measuring instrumentation

Fig. 6 Actual test setup

4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴거동 특성

Fig.7에 전단기의 균열 발생 특성 및 형상을 주요 하중단계 별로 나타내었다. 부재의 균열 및 파괴거동은 전단기의 형상에 따라 차이를 나타내었다. 초기균열은 전단기의 하부와 복부 중앙에서 사인장 균열이 발생하였다. 또한 횡방향 구속응력이 작은 부재의 경우, 전단기 하부에서 지압에 의한 파괴가 다수 발생하였다. 전단기 하부에서 발생한 초기균열은 전단기 상부로 진전되는 형상을 나타낸다. 일부 부재의 초기 균열은 전단기 상단에서 발생하였으며, 이는 굽은 골재와 바인더의 국부적 계면 파괴로 인해 전단기 상부에서 하부로 균열 확대에 의한 파괴가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 최종 균열의 형태를 살펴보면, 수직하중이 극한 상태에 도달함과 동시에 전단기 접합면에서 전단절단파괴(shear-off failure)로 진행되는 것을 관찰할 수 있었다.

전단기 부재를 제작할 때의 얇은 철재 거푸집을 사이에 두고 male key와 female key 콘크리트를 타설하였다. 이후 콘크리트를 양생하고 나서 거푸집을 제거한 후에 male key와 female key의 경계면에 접착제 도포 없이 맞대었기 때문에 경계면 사이에 불가피하게 미미한 시공오차 영향 (imperfection effect)이 발생할 가능성이 있다. 이러한 영향 때문에 균열이 전단면의 하단부에서부터 시작된 걸로 판단된다. 경계면에 접착제를 도포한 후 접합부를 맞댄다면 이러한 가능성은 줄어들 것으로 판단된다.

콘크리트 압축강도가 24 MPa인 부재의 경우, 접합면 아래 부분에서 초기에 균열이 발생하며, 가력 하중의 증가에 따라

지압에 의한 파괴로 진전되는 것을 관찰할 수 있었다. 수직하중이 극한 상태로 도달하게 되면서 최종적으로 전단절단파괴가 발생하였다. S45-P1-F24 부재의 경우, 재하하중이 35 kN 일 때 전단키의 하단에서 초기 균열이 발생하고, 초기 균열폭은 0.13 mm로 관찰되었다. 초기 균열 이 후에도 하중은 최대 하중까지 점진적으로 증가된다. 이는 초기 균열 발생 이후에도 횡방향 구속응력에 의한 전단키의 맞물림 효과에 의해 하중분담능력이 지속적으로 유지되기 때문이다. 최대하중은 48.83 kN이며 이때의 균열폭은 0.53 mm 이다(Fig. 7(a)). 전단키 경사각도가 60°와 70° 일 때, 부재의 전단키 윗부분에서 균열이 발생하기도 하였다. 극한상태에 도달하면서 지압파괴 및 전단키에서의 전단 절단 파괴를 나타내었다.

콘크리트 강도가 40 MPa인 부재를 살펴보면, 가력 초기에 접합면 중앙부분에서 다수의 사인장 균열이 발생하였다. 수직하중이 극한 상태에 도달하면서 전단키 접합면에서 전단절단 파괴가 발생하였다. 부재 S60-F40-P3의 경우, 재하하중이 64 kN일 때 전단키의 하단에서 초기 균열이 발생하였으며, 초기 균열폭은 0.15 mm이다. 초기균열 발생 후에도 하중은 최대하중까지 증가한다. 최대하중은 108.83 kN이며, 최대하중 단계에서의 균열폭은 0.70 mm이다(Fig. 7(b)). 콘크리트 강도가 24 MPa인 실험체 보다 40 MPa인 실험체에서 전단키가 부담하는 하중이 전반적으로 더 높은 것으로 측정되었다. 또한, S45-F40 씨리즈 부재는 S60-F40 또는 S70-F40 씨리즈 부재에 비해 전단키 맞물림 효과가 상대적으로 작아서 전단키가 쉽게 탈락되었다.

Fig. 7 Crack and failure patterns

안에 측정된 전단키 부근의 콘크리트 국부 변형률을 나타내었다. 변형률 게이지 C1은 인장변형률을 나타내고, 변형률 게이지 C2 및 C3는 압축변형률을 나타낸다. 하중이 40 kN일 때까지 하중-변형률은 거의 선형 관계를 나타내고, 이후에는 비선형관계를 나타낸다. 또한, 비선형 거동 단계에서는 인장변형률이 압축변형률 보다 큰 변형률 특성을 나타내었다.

Fig. 8 Concrete strain measured value (S60-P3-F40)

4.2 하중-변위 관계 특성

수직하중 재하동안의 부재의 연직하중-수직변위 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 하중-수직변위 관계곡선은 초기에 선형 관계를 나타낸 후 비선형 관계를 나타낸다. 하중-변위 곡선은 초기균열상태까지 선형관계를 나타낸다. 비선형 하중-변위 관계구간에서 곡선은 완만하게 증가한다. 최대하중 도달 후 변위는 급격하게 증가하고 있다. 이러한 변위 거동 특성은 수직하중이 접합부에서의 두 시편이 횡방향으로 변위가 발생한 상태에서 전단키의 전단파괴 또는 국부적인 지압파괴와 더불어 수직변위가 급격하게 발생하기 때문으로 판단된다.

대표적으로 S70-P3-F24 및 S45-P1-F40 부재의 하중-변위 관계 특성을 고찰하였다. 부재 S70-P3-F24는 재하하중이 64.8 kN일 때 초기균열이 발생하였고 이때의 수직변위는 7.54 mm로 관찰되었다. 이후 하중-변위 관계 곡선은 최대하중까지 완만하게 증가하며, 최대하중에서의 수직변위는 17.35 mm이다. 부재 S45-P1-F40 부재의 초기균열 상태에서의 수직변위는 2.81 mm이다. 초기균열 발생 후에 하중은 거의 일정한 상태에서 변위는 증가한다. 이는 초기균열 발생 후에 일시적으로 전단키의 맞물림 상태가 재배열되는 과정에서의 거동 특성으로 판단된다. 초기균열 이후에 하중은 증가한 상태에서 수직변위는 5 mm까지 증가하였다. 이후 하중-수직변위관계 곡선은 최대하중까지 완만하게 증가하며, 최대하중 상태에서의 수직변위는 11.3 mm이다.

Fig. 8에 대표적으로 부재 S60-P3-F40의 수직하중 재하 동

전단을 받는 부유식 콘크리트 구조물 접합부의 강도 평가

(a) S45-F24 series specimens

(b) S60-F24 series specimens

(c) S70-F24 series specimens

(d) S45-F40 series specimens

(e) S60-F40 series specimens

(f) S70-F40 series specimens

Fig. 9 Load-deflection curves

4.3 전단강도 특성

실험부재 접합부 전단강도측정결과를 Table 1에 나타내었다. 전단키의 경사각도 변화에 따른 전단강도를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 전단키 경사각도가 증가함에 따라 전단강도는 증가하는 경향을 나타내고 있는 부재들을 살펴보면 다음과 같다. 콘크리트 강도가 24 MPa 이고 횡방향 구속응력이 1 MPa 일 때, 전단키 경사각도가 45°, 60° 및 70°로 증가함에 따라 전단강도는 48.8, 58.5 및 66.7 kN으로 증가하였다. 또한, 콘크리트 강도가 40 MPa 이고 횡방향 구속응력이 3 MPa 일 때, 전단키 경사각도가 45°, 60° 및 70°로 증가함에 따라 전단강도는 76.2, 108.8 및 115.1 kN으로 증가하였다.

전단키 경사각도가 증가함에 따라 전단강도가 각각 다른 경향을 나타내는 부재들을 살펴보면 다음과 같다. 콘크리트 강도가 24 MPa 이고 횡방향 구속응력이 2 MPa 인 경우, 전단키 경사각도 45° 일 때 98.3 kN으로 크게 측정 되었다. 경사각도 70° 일 때 76.8 kN, 경사각도 60° 일 때 41.2 kN으로 측정되었다. 그리고 콘크리트 강도가 24 MPa 이고 횡방향 구속응력이 3 MPa 의 부재들 또한, 경사각도 60° 일 때 88.9 kN이고, 경사각도 45°인 부재가 86.3 kN, 마지막으로 경사각도 70° 부재는 79.8 kN으로 나타내었다. 또한, 콘크리트 강도가 40 MPa이고 횡방향 구속응력이 1 MPa 인 경우, 경사각도 45° 일 때 68.5 kN, 경사각도 70° 일 때 60.7 kN, 경사각도 60° 일 때 59.5 kN으로 나타내었다.

전단키 경사각도가 증가함에 따라 전단강도가 증가하는 부재들이 있는 반면에 경사각도가 증가함에 따라 각각의 다른 전단강도를 나타내는 부재에 있어 이에 대한 추가 상세 연구가 필요하다.

횡방향 구속응력 크기에 따른 전단강도를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 횡방향 구속응력이 증가함에 따라 최대 전단하중은 전반적으로 증가한다. 예를 들면, 전단키 경사각도는 70°이고 콘크리트 강도가 40 MPa 인 경우, 횡방향 구속응력이 1, 2 및 3 MPa 로 증가함에 따라 전단강도는 66.7, 76.8 및 79.8 kN으로 증가하였다. 또한, 전단키 경사각도는 60°이고 콘크리트 강도가 40 MPa 인 경우, 횡방향 구속응력이 1, 2 및 3 MPa 로 변화함에 따라 전단강도는 59.5, 86.3 및 108.8 kN으로 증가하였다. 마지막으로 전단키 경사각도는 45°이고 콘크리트 강도가 40 MPa 인 경우, 다른 부재들과 달리 횡방향 구속응력이 2 MPa 일 때, 전단강도 값은 84.1 kN으로 크게 측정되었으며, 그 다음 P3, P1의 순으로 전단강도 값이 측정되었다. 전단키 경사각도와 횡방향 구속응력 사이에 상호작용관계가 있는지에 대한 추가적인 상세 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이 실험연구에서의 횡방향 구속응력은 콘크리트 구조 모듈에 도입되는 횡방향 프리스트레스 효과를 나타내며, 프리스트레스 효과는 전단강도에 큰 영향을 미치는 것을 나타낸다.

(a) Specimens with compressive strength of 24 MPa

(b) Specimens with compressive strength of 40 MPa

Fig. 10 Shear strength at different inclination of shear key

(a) Specimens with compressive strength of 24 MPa

(b) Specimens with compressive strength of 40 MPa

Fig. 11 Shear strength at different confining stress levels

4.4 전단강도 평가

프리캐스트 콘크리트 모듈 부재 접합부의 전단강도 실험결과와 AASHTO (1999) 설계기준에 의한 전단강도 예측결과를 비교 분석하였다. 또한, 전단강도 예측식을 제안하였으며, 제안식에 의한 전단강도 예측결과와 전단강도 측정결과를 비교하였다.

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

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

여기서, A_K : 전단키 밑면 면적 (m^2)

A_{sm} : 평면 접합부 면적 (m^2)

A_{joint} : 접합부 전체 면적 ($=A_K + A_{sm}$)

f'_c : 콘크리트 압축강도 (MPa)

σ_n : 접합부의 구속응력 (MPa)

AASHTO 기준식에 의한 모듈 접합부의 전단강도 예측결과를 Table 1과 Fig. 12(a)에 나타내었다. AASHTO 기준식에 의한 전단강도 예측값과 실험값을 비교한 결과, 실험값에 대한 예측값 비의 평균은 0.89로써 예측값은 전반적으로 실험값에 근접하고 있다.

식 (1)의 AASHTO 제안식은 전단강도를 전단키의 밑면 부분과 접합부의 평면 부분 면적을 토대로 전단강도를 평가하고 있다. 전단키의 밑면 크기가 동일한 조건에서 전단키의 경사각도가 다를 경우 즉, 전단키의 형상의 변화에 따른 전단강도 영향을 평가할 수 없는 한계가 있다. 따라서 이 연구에서는 전단키 형상, 구속응력 변화 및 콘크리트의 압축강도 변화에 따른 실험결과를 토대로 접합부의 전단강도 평가식을 식 (2)와 같이 제안하였다. 제안식에서는 전단키의 형상에 따른 전단강도 변화를 반영하기 위하여 전단키의 밑면 부분과 상면 부분의 전단강도 기여 부분을 반영하였다.

$$V_j = \{0.20 A_K + 0.06 A_t\} f'_c + 0.60 \sigma_n A_{joint} \quad (\text{MN}) \quad (2)$$

여기서, A_K : 전단키의 밑면 면적 (m^2)

A_t : 전단키의 상면 면적

A_{sm} : 평면 접합부 면적 (m^2)

A_{joint} : 접합부의 면적 ($=A_K + A_{sm}$)

f'_c : 콘크리트 압축강도 (MPa)

σ_n : 접합부의 구속응력 (MPa)

제안식에 의한 모듈 접합부의 전단강도 예측값을 Table 1과 Fig. 12(b)에 나타내었다. 전단강도 예측값은 실험값에 근

접하고 있으며 실험값에 대한 예측값 비의 평균값은 0.95를 나타내고 있다. 이 연구에서의 제안식에 의한 전단강도 예측값은 AASHTO 제안식에 의한 예측값보다 실험값에 더욱 근접하고 있다. 따라서, 이 연구에서의 제안식을 토대로 프리캐스트 콘크리트 모듈 접합 구조물의 전단강도를 더욱 효과적으로 예측할 수 있다고 판단된다. 또한, 후속 연구에서는 횡방향 구속응력과 경사각도 사이의 상관관계를 면밀히 검토한 후, 제안식에 변수들을 반영하는 것이 더욱 합리적이라고 판단된다.

(a) AASHTO

(b) Suggestion in this study

Fig. 12 Comparison of shear strength prediction and test results

5. 결 론

이 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 부유식 구조물 모듈 접합부의 전단강도특성 실험을 수행하였다. 또한, 전단강도 예측식을 제안하여 전단강도 측정값과 예측값을 비교 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 초기균열은 전단키의 하부와 복부 중앙에서 사인장 형태로 균열이 발생하였다. 전단키 하부에서 발생한 초기균열은 전단키 상부로 진전되는 형상을 나타내었다. 일부 부재의 초기 균열은 전단키 상단에서 발생하였으며, 이는 굽은

- 골재와 바인더의 국부적 계면파괴로 인해 전단키 상부에서 하부로 균열 확대에 의한 파괴가 발생하는 것으로 판단된다.
- 극한하중상태에서의 파괴형상은 전단키 접합면에서의 급격한 균열의 확대와 더불어 전단절단파괴를 나타내었으며, 일부 부재는 전단키에서의 국부적인 지압파괴 형태를 나타내었다.
 - 횡방향 구속응력이 증가함에 따라 콘크리트 모듈 접합부의 전단강도는 증가하였다. 이러한 실험결과는 부유식 콘크리트 모듈 구조에 도입되는 프리스트레스 효과가 전단강도에 주요한 영향인자임을 나타낸다.
 - 전단키 경사각도가 45°일 때 전단키의 맞물림 효과가 감소하는 것으로 나타나며, 실제 구조물 설계 시에 전단키 경사각도가 60° 이상으로 하는 것이 구조물의 일체성 확보에 유리할 것으로 판단된다.
 - 콘크리트 모듈 접합부 전단키의 형상에 따른 전단강도 영향을 고려한 전단강도 평가식을 제안하였다. 제안식에 의한 전단강도 예측값은 실험값에 매우 근접하였다. 따라서, 이 연구에서의 제안식은 모듈 접합부 전단 강도 예측에 유용하게 활용될 수 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

- Na, S. W. and Song, M. G.(2009), "Application of Hydroelastic Analysis Software on Very Large Floating Structures", Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 22, No. 5, pp. 78-85.
- Yang, I. H. and Kim, K. C.(2012), "Strength of Joint in Floating Structures Constructed with Precast Concrete Modules", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 3, pp. 197-204.
- Lee, C. H. et al.(2011), "An Experimental Study on the Joints in Ultra High Performance Precast Concrete Segmental Bridges", Journal of Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 2, pp. 235-244.
- Han, M. Y. et al.(2006), "An Experimental Study for Shear Loading Capacity of Segmental Members Depending on Various Types of Shear Connector", 2006 Journal of The Korean Society of Civil Engineers, pp. 1312-1315.
- Hong, S. Y. et al.(2001) "State-of-the Art of Very Large Floating Structures", Journal of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 4, pp. 29-38.
- AASHTO (1999), "Guide Specifications for the Design and Construction of Segmental Concrete Bridges," Second Edition, pp. 3-118.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Koseki, K. and Breen, J. E. (1983), Exploratory Study of Shear Strength of Joints for Precast Segmental Bridges", FHWA/TX-84.
- 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.
- 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.
- Starr, P. and Wainwright, D. A. (1996), "Design and Construction of a Concrete Floating Berth", Engineering Structures, Vol. 18, No. 11, pp. 837-841.
- Tsinker, G.P. (1986), Floating Ports: Design and Construction Practices.
- Turno, 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.
- 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.

원고접수일 : 2012년 12월 24일

심사완료일 : 2013년 03월 25일

원고채택일 : 2013년 03월 25일