

CT형강 전단연결재가 적용된 합성형 PHC벽체파일-하부슬래브 연결부 성능에 관한 실험적 연구

마 호 성¹⁾ · 원 정 훈^{2)*} · 이 종 구³⁾

¹⁾ 교수, 호서대학교, 토목공학과 ²⁾ 조교수, 충북대학교, 안전공학과 ³⁾ 책임연구원, 포항산업과학연구원, 강구조연구소

An Experimental Study on Structural Capacity of Joint Between Composite PHC Wall Pile and Bottom Slab with CT Shear Connector

Mha, Ho Seong¹⁾ Won, Jeong Hun^{2)*} Lee, Jong Ku³⁾

¹⁾ Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University, Chungnam, 336-795, Korea

²⁾ Assistant Professor, Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea

³⁾ Principal Researcher, Steel Structure Research Division, RIST, Incheon, 406-840, Korea

ABSTRACT : This paper investigated the structural capacity of the CT shear connectors, which is a kind of the perfobond rib and functions as an anchor transferring the tension force in the joint between a composite PHC wall pile and a bottom slab. The direct pull-out test was performed for various specimens. From failure modes and load-displacement curves, it was found that transverse rebars should be placed to holes in a web to restrict pull-out failure of CT shear connectors. The results of additional tests for specimens with transverse rebars and various support lengths indicated that all specimens were failed by the tension failure of PHC pile before pull-out failure of CT shear connector and concrete pull-out failure. Thus, the CT shear connector could endure the tension force between the PHC wall pile and the bottom slab.

KEYWORDS : CT shear connector, joint, composite PHC wall pile, bottom slab, direct pull-out test, transverse rebar

1. 서 론

최근 개발된 합성형 벽체파일은 PHC(Pretensioned spun High strength Concrete)파일의 단점을 보완하여 PHC 파일에 CT형강을 합성시켜 벽체파일의 구조적 성능과 다른 부재와의 연결 등의 기능성을 향상시킨 중공 사각형 형상의 고강도 콘크리트 파일이다. CT형강의 복부에 다수의 천공홀을 설치하여 복부가 perfobond rib이라고 불리는 전단연결재(CT형강 전단연결재) 역할을 하여 PHC파일과 CT형강은 합성 구조가 되며, 벽체파일의 표면에 노출된 CT형강의 플

랜지를 이용하여 벽체파일과 타 부재와의 연결이 쉽게 이루어질 수 있다. 합성형 벽체파일의 현장 적용을 위한 기초 연구로 실물 크기의 시편을 제작하여 휨 실험을 통해 고강도 콘크리트와 CT형강의 합성거동과 합성형 벽체파일의 극한강도 등의 구조적 성능을 검증한 연구가 최근 진행되었다¹⁾.

합성형 벽체파일은 지하차도 등에 적용되어 가설벽체와 영구벽체의 역할을 모두 수행할 수 있는 특징을 가진 구조물이다. 시공 중 가설벽체의 안전성을 확보하기 위하여 설치되는 버팀대(strut)는 합성형 벽체파일의 표면에 노출된 CT형강의 플랜지에 연결될 수 있다. 합성형 벽체파일은 지하차도 등의 영구벽체로써 하부 슬래브와 연결이 되어야 한다. 먼저 설치된 벽체와 나중에 현장 타설된 하부 슬래브는 스티드를 이용한 힌지 상태나 모멘트 플레이트를 이용한 강결합 상태로 연결되므로 합성형 벽체파일의 CT형강 플랜지를 이용하여 별도의 정착관 없이 스티드나 모멘트 플레이트를 쉽게 설치할 수 있다.

Note.-Discussion open until April 30, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 23, 2013; revised September 6, 2013; approved on September 17, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-43-261-2459 Fax. +82-43-265-2457
E-mail: jhwon@chungbuk.ac.kr

CT형강의 복부에 일정한 간격으로 설치된 천공홀에 의해 복부는 perfbond rib이라 불리는 전단연결재 역할을 수행한다. Zellner^[2]에 의해 개발된 perfbond rib의 전단저항은 천공된 홀에 의해 발생하는 콘크리트의 다웰효과, 홀을 관통하는 철근에 의한 저항, 플레이트 선단의 지압효과, 그리고 강재와 콘크리트 사이의 부착력에 의해 발생하며^[3], 전단강도를 추정하기 위해 다양한 실험과 해석적 연구가 진행되어 왔다. 또한, 최근 perfbond rib 전단연결재는 강-콘크리트 합성보의 전단연결재 외에도 혼합구조 연결부와 일체식 교대 등 다양한 분야에 적용되고 있다^{[4],[5]}.

합성형 벽체파일의 일부분에 설치된 CT형강 전단연결재는 휨을 받는 부재의 합성 거동을 위한 전단연결재 역할을 하므로 push-out 실험, 보 실험 및 해석에서 제안한 전단강도 추정식을 적용하여 CT형강 전단연결재의 전단강도를 추정할 수 있으며, 실물 휨 실험을 통해 적용성이 검증되었다^[1]. 하부 슬래브 연결부에 위치한 CT형강 전단연결재는 힌지 연결의 경우, perfbond rib의 전단강도로 플랜지에 설치된 스티드의 전단력을 지지하므로 전단연결재의 역할을 수행한다. 그러나 모멘트 플레이트를 이용한 강결합 방법으로 합성형 벽체파일과 하부 슬래브를 연결할 경우, CT형강 전단연결재는 합성 거동을 위한 전단연결재 역할 뿐만 아니라 모멘트 플레이트로 전달되는 인장력에 저항하는 앵커의 역할도 수행하여야 한다.

본 연구에서는 하부 지반이 연약한 경우에도 설치할 수 있는 강결합 방법으로 벽체파일과 하부 슬래브를 연결하는 방법에 관심을 두고 있으므로 우선적으로 CT형강 전단연결재가 앵커로써 충분한 역할을 수행하는지 검토할 필요가 있다. 일반적인 앵커에 대해서는 다양한 연구 결과를 바탕으로 강도 및 파괴형상을 추정할 수 있는 설계법이 존재하나^{[6],[7]}, perfbond rib의 인발강도(뺨힘강도)를 예측하기 위한 연구 결과는 거의 없다. Perfbond rib의 저항 메커니즘으로부터 perfbond rib의 전단저항으로 앵커의 인발파괴를 저항함을 유추할 수 있으나, 압축강도 80MPa 이상인 고강도 PHC 파일에 설치된 CT형강 전단연결재가 앵커로써의 역할 여부를 확인하기 위해서는 직접 인발실험을 통해 파괴거동과 성능을 검증할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 실물 크기의 다양한 합성형 벽체파일 실험체를 제작하여 CT형강 전단연결재에 대해 직접 인발 실험을 실시하였으며, 파괴형상과 극한강도를 분석하여 합성형 벽체파일과 하부 슬래브 강결합 연결부에 적용된 CT형강 전단연결재의 성능을 검증하였다.

2. 합성형 벽체파일과 하부 슬래브 연결부

합성형 벽체파일은 PC 강봉과 철근, 천공홀을 갖는 CT형강을 설치한 몰드에 콘크리트를 투입하고 긴장력을 가한 후 원심성형으로 제작되며(Fig. 1) 콘크리트는 고강도(80MPa 이상)의 압축강도를 갖는다. 합성형 벽체파일은 가설벽체의 역할을 수행할 뿐만 아니라 모멘트와 압축력을 동시에 받는 영구벽체의 역할을 하므로, 최근 지하차도의 박스구간에 사용되고 있다(Fig. 2).

합성형 벽체파일과 하부 슬래브를 연결시키는 방법으로 Fig. 3과 같이 3가지 방법이 일반적으로 적용된다. 힌지 연결방법으로 Fig. 3(a)와 같이 CT형강의 플랜지에 스티드를 설치한 후 하부 슬래브 콘크리트를 타설하는 방법이 있으며, 강결합으로는 Fig. 3(b)에 보여진 바와 같이 스티드 외에 하부 슬래브 철근을 CT형강에 용접하여 부착시켜 모멘트를 전달하는 방법과 Fig. 3(c)와 같이 모멘트 플레이트를 설치한 후 철근을 용접하여 모멘트를 전달하는 방법이 있다. 강결합 방법 중에서 모멘트 플레이트를 설치하는 방법이 시공성과 하중 전달이 보다 확실하여 선호되므로 본 연구에서는 모멘

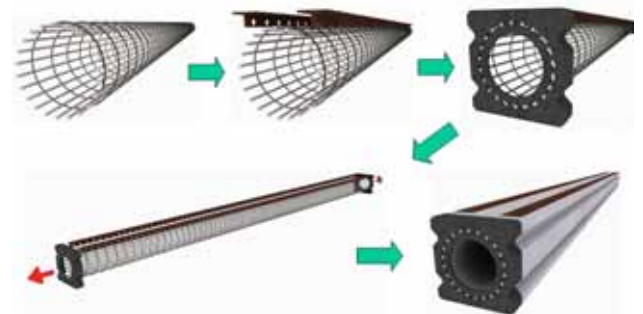


Fig. 1 Concept of composite PHC pile^[1]



Fig. 2 Application example of composite PHC pile in box structures

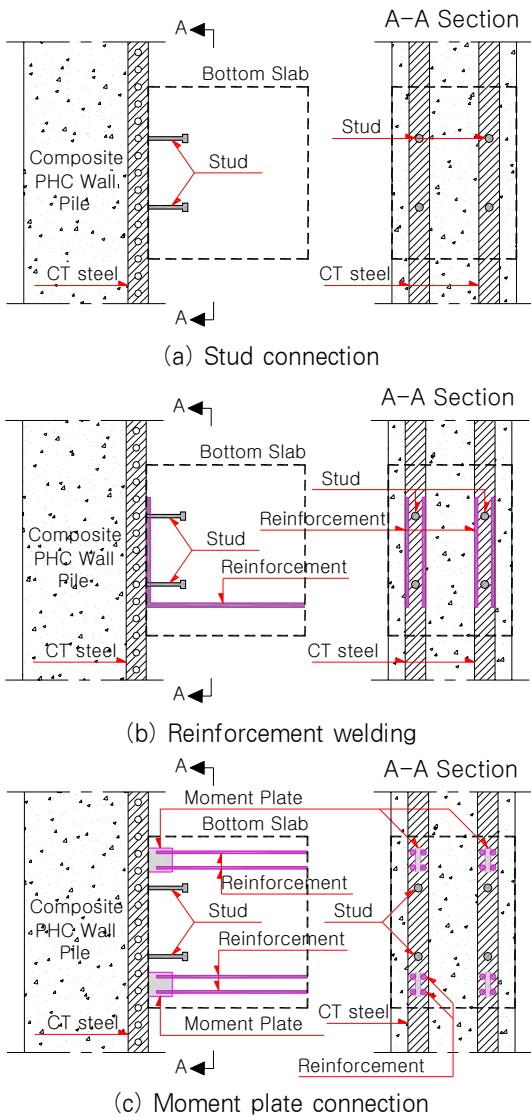


Fig. 3 Connection methods between PHC pile wall and bottom slab



Fig. 4 Example of moment plate connection

트 플레이트를 이용한 강결합 방법을 연구대상으로 하며, 시공 예는 Fig. 4와 같다.

모멘트 플레이트를 이용한 강결합 방법의 적용시 모멘트 플레이트와 CT형강 전단연결재 설계를 위해 먼저 모멘트 플레이트에 작용하는 인장력(T)을 결정하여야 한다. 인장력은 하부 슬래브와 벽체파일의 연결부에 작용하는 휨 모멘트(M)를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$T = M/h \quad (1)$$

여기서, h 는 하부 슬래브 연결 구간에 설치된 상부 모멘트 플레이트부와 하부 모멘트 플레이트 사이의 거리이다.

3. CT형강 전단연결재 강도 평가

모멘트 플레이트를 이용한 강결합에서 CT형강 전단연결재는 모멘트 플레이트로 전달되는 인장력에 저항하는 앵커의 역할을 수행한다. 일반적으로 인장력을 받는 앵커의 파괴는 앵커강재의 인장파괴, 앵커의 인발파괴(뿔힘파괴), 콘크리트의 파괴 중 하나의 형태로 나타난다. CT형강이 벽체파일의 길이 방향을 따라 설치되므로, CT형강 전단연결재가 모멘트 플레이트보다 먼저 파괴되는 앵커강재의 인장파괴는 발생될 확률이 작으며, 앵커의 인장강도는 CT형강 복부재의 재료 인장강도와 유효 단면적을 곱하여 계산될 수 있다.

Perfobond rib 전단연결재의 전단강도 추정식에 사용된 기존의 push-out 실험과 휨 실험에서 perfobond rib에 작용하는 하중방향은 길이방향이다. 벽체파일과 하부 슬래브 연결부의 CT형강 전단연결재에 작용하는 인장력은 길이방향에 수직으로 작용하나 CT형강 전단연결재에 설치된 천공홀은 원형의 형태를 가지므로 콘크리트 다웰효과와 홀을 관통하는 철근에 의한 저항이 모멘트 플레이트로부터 전달되는 인장력에 저항할 것이라고 예측될 수 있다. 따라서, CT형강 전단연결재의 전단강도가 앵커의 인발강도가 된다고 가정할 수 있다. 단, 부착력의 효과는 미비하다고 가정한다.

다수의 연구자들이 제안한 perfobond rib 전단연결재의 전단강도 추정식 중^{(8),(9),(10),(11),(12),(13),(14)}에서 본 연구에서는 널리 이용되는 Oguejiofor와 Hosain⁽⁹⁾에 의해 제안되어진 다음의 식을 이용하여 CT형강 perfobond rib의 인발강도를 추정하였다.

$$Q_u = 4.50 h t f_{ck} + 0.91 A_{tr} f_y + 3.31 n d^2 \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

여기서, Q_u 는 perfobond rib 전단연결재 1개의 극한 전단

강도(N)이며, h 는 rib의 높이(mm), t 는 rib의 두께(mm)이다. f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도(MPa), A_{tr} 은 횡방향 관통철근의 총 단면적(mm^2), f_y 는 철근의 항복강도(MPa), n 은 리브 홀의 수, 그리고 d 는 리브 홀의 지름(mm)이다.

모멘트 플레이트로부터 인장력을 받는 경우 선단의 지압에 의한 저항은 없으므로 위 식은 다음과 같이 적용된다.

$$Q_u = 0.91 A_{tr} f_y + 3.31 n d^2 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

앵커재에 의한 콘크리트 파괴강도의 추정에는 앵커설계에 적용되는 CCD(Concrete capacity design) 방법 등을 적용하여 산정할 수 있으나^[6], perFOBOND 리브 전단연결재를 적용할 경우 강도 평가에 가장 중요한 요소인 문힘길이 산정이 명확치 않은 문제점이 존재한다.

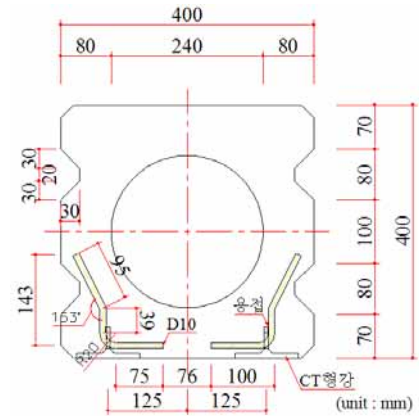
4. 직접 인발실험

4.1 실험체 제원

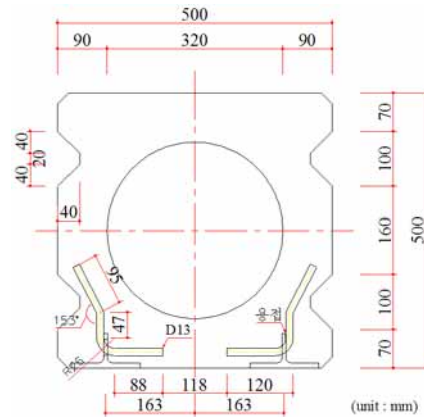
인발실험에 사용된 실험체는 기존 연구^[1]에서 휨 성능이 검증된 후 제품화가 이루어져 현장에 적용될 예정인 벽체파일의 크기를 반영하여 400mm(S400), 500mm(S500), 600mm(S600) 세 가지로 구별되어 제작되었으며, 각각의 형상은 Fig. 5와 같다. CT형강의 천공홀을 통과하는 관통철근은 S400 시편에서는 직경 10mm 철근이 적용되었으며, S500과 S600 시편에서는 직경 13mm 철근이 적용되었다.

실험체에 사용된 CT형강은 2가지 형태가 적용되었으며 (Type-1: 50×100×6×8, Type-2: 62.5×125×6.5×9), 복부에 천공된 홀의 직경은 Type-1에서 20mm, Type-2에서 30mm이다. 천공홀의 간격은 모두 100mm이다. 적용된 CT형강의 제원은 Fig. 6과 같다.

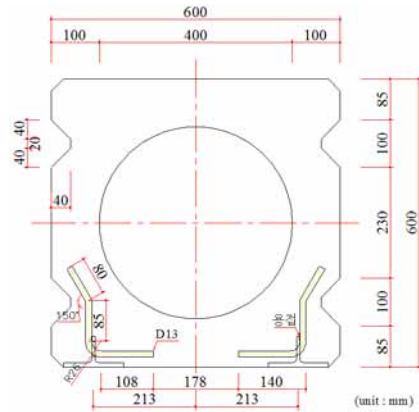
콘크리트의 설계 압축강도(f_{ck})는 80MPa이며, CT형강은 항복강도 240MPa인 SS400 일반 구조용 압연강재가 사용되었으며, 천공홀 관통철근은 항복강도 300MPa이다. 실험체는 공장에서 실제 적용 제품과 동일하게 제작되어 설계 압축강도 80MPa를 만족시키는 것으로 나타났으며, 또한 동일한 과정으로 제작된 합성형 벽체파일의 휨 극한 강도를 평가하기 위한 기초연구^[1]의 결과를 참조하여 시험시 별도의 공시체 실험은 실시되지 않았다. 강재의 경우에도 물성의 불확실성이 작으므로 시편실험은 수행되지 않았다. 또한, 실험체에는 프리텐션 이형 PC강봉이 사용되었으나, 인발실험에 강



(a) 400x400 Specimen(S400)



(b) 500x500 Specimen(S500)



(c) 600x600 Specimen(S600)

Fig. 5 Section dimension of specimens

봉은 영향을 미치지 않는다.

벽체파일과 하부 슬래브의 연결부의 인발실험을 위해서는 실제 거동을 잘 예측할 수 있는 지지점 거리를 가정하여야 한다. 설치장소의 흙의 상태에 따른 수평 배면토압, 슬래브 연결부 밑으로 연장된 벽체파일 깊이의 영향, 그리고 연결부에 작용하는 힘에 의한 인장력의 작용 등 다양한 요소를 고려할 때 벽체파일에는 인장력과 함께 어느 정도 휨 모멘트가 작용한다고 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 하부 슬래브의 두께, 하부 슬래브 하단에 설치되는 모멘트 플레이트의

위치 등을 반영하여 휨의 영향이 반영된 2.5m의 지지점 거리를 산정하여 인발실험을 실시하였으며, 또한 실제 조건보다 지지점 길이를 짧게 하여 인장력에 의한 영향이 대부분을 차지한다고 가정할 수 있는 지지점 거리 1.0m도 대상으로 실험을 실시하였다.

실험은 관통철근 설치 필요성을 확인하기 위한 1단계 실험과 관통철근이 설치된 다양한 실험체들의 성능을 검증하기 위한 2단계로 실시되었으며, 각 단계에 사용된 실험체의 단면과 CT 형강 형태, 관통철근 제원, 지지점 길이는 Table 1과 같다. 실험체 명에서 첫 번째 항목의 NO는 관통철근이

없는 경우를, RE는 관통철근을 갖는 경우를 나타내며, 두 번째 항목은 단면 형상과 제원(Fig. 5의 S400, S500, S600)을 의미한다. 또한, 2단계 실험의 실험체 명에서 세 번째 항목은 실험체의 지지길이(25는 지지길이 2.5m, 10은 지지길이 1.0m)를 나타낸다.

4.2 하중재하 실험

실험은 포항산업과학연구원 강구조연구소의 UTM을 이용하여 실시되었다. 스티드와 앵커볼트와 같은 앵커재에 대해서는 성능을 검증할 수 있는 표준화된 시험기준이 존재하나^[6], 인장력을 받는 앵커재로서의 perfbond rib의 인발 성능에 대해서는 연구결과가 거의 없고 명확한 시험기준이 없으므로 본 연구에서는 CT형강에 인장지그를 용접하여(Fig. 7) 직접 인발실험을 실시하였다.

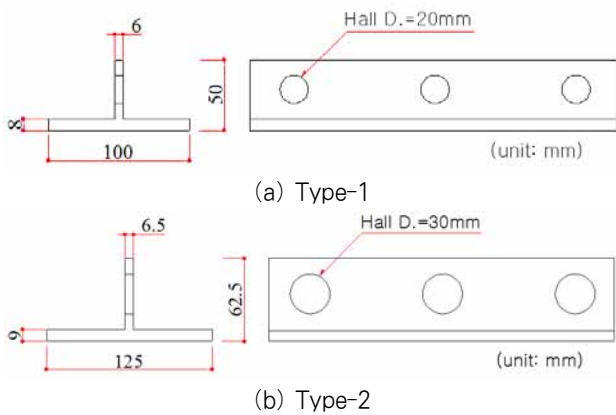


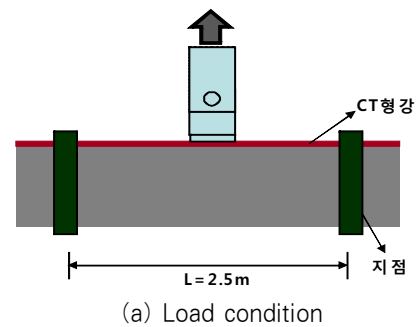
Fig. 6 Dimension of CT structural steel

Table 1. Classification of specimens

| Specimen name | Section type | CT type | Hall reinforcement | Support length |
|------------------|--------------|---------|--------------------|----------------|
| · 1st Experiment | | | | |
| NO-400 | S400 | Type-1 | - | 2.5m |
| NO-500 | S500 | | - | |
| RE-400 | S400 | | D10 | |
| RE-500 | S500 | | D13 | |
| · 2nd experiment | | | | |
| RE-400-25-1 | S400 | Type-1 | D10 | 2.5m |
| RE-400-25-2 | | | | |
| RE-500-25-1 | S500 | Type-2 | D13 | 2.5m |
| RE-500-25-2 | | | | |
| RE-600-25-1 | S600 | Type-2 | D13 | 2.5m |
| RE-600-25-2 | | | | |
| RE-400-10-1 | S400 | Type-1 | D10 | 1.0m |
| RE-400-10-2 | | | | |
| RE-500-10-1 | S500 | Type-2 | D13 | 1.0m |
| RE-500-10-2 | | | | |
| RE-600-10-1 | S600 | Type-2 | D13 | 1.0m |
| RE-600-10-2 | | | | |



Fig. 7 Configuration of lifting lug



(b) Photo of pull-out test

Fig. 8 Pull-out test (support length=2.5m)

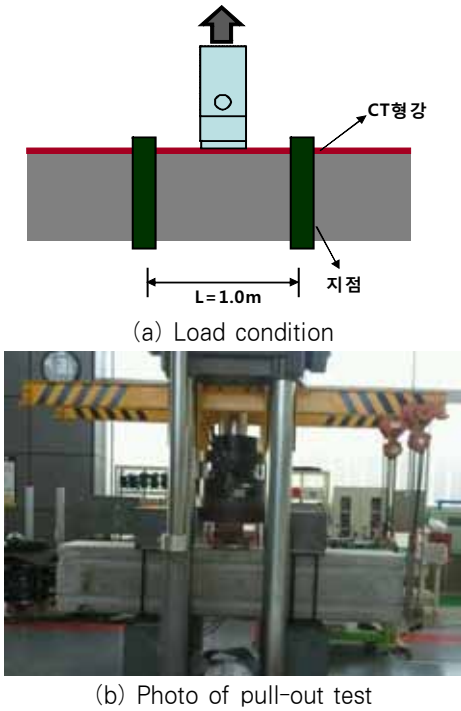


Fig. 9 Pull-out test (support length=1.0m)

인장지그의 폭은 모멘트 플레이트의 폭인 200mm로 하였으나, 인발하중에 의한 지그와 CT형강의 용접 파단을 방지하기 위하여 추가적인 플레이트를 인장지그와 CT형강 사이에 설치하였다. 실험체 양단은 프레임으로 고정하여 지지를 하였으며, 지지점 거리 2.5m인 경우와 1.0m인 경우의 인발 실험 전경은 각각 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. 인발하중에 따른 시편의 변위는 하중이 재하되는 시편의 중앙지점을 측정하였다.

5. 결과분석

5.1 관통철근 효과 분석

합성형 벽체 파일의 일반부에 설치된 CT형강 전단연결재에는 일반적으로 관통철근이 설치되지 않는다. 그러나 하부 슬래브 연결부에 위치한 경우는 전단연결재 역할 외에도 앵커의 역할도 수행하므로, 관통철근이 없는 일반부의 상재가 동일하게 적용될 수 있는지 확인할 필요가 있다. 따라서 첫 번째 실험으로 관통철근 유무에 따른 직접 인발실험을 실시하여 결과를 분석하였다.

5.1.1 파괴형상

철근 보강이 없는 경우인 NO-400과 NO-500의 파괴시형상은 동일하게 CT형강 전단연결재의 파괴(인발파괴[뿔힘파괴])가 발생하였으며, NO-500 실험체에 대해 파괴시형



(a) NO-500



(b) RE-500

Fig. 10 Failure mode according to existence of transverse rebars

상을 Fig. 10(a)에 나타내었다. 관통철근을 설치한 경우인 RE-400과 RE-500 실험체에서는 CT형강 전단연결재의 파괴 전에 벽체파일 자체의 콘크리트 인장파괴가 발생하였으며, RE-500 실험체의 파괴형상을 Fig. 10(b)에 나타내었다. 관통철근의 보강으로 전단연결재의 강도(앵커의 인발파괴 강도)가 증가되어 CT형강의 인발파괴가 발생하지 않았다. 또한, CT형강 자체의 인장파괴와 앵커(CT형강 전단연결재)로 인한 콘크리트의 파괴도 발생하지 않았으며, 벽체파일의 취약 단면에서 콘크리트의 인장파괴가 발생했음을 알 수 있다. 즉, 관통철근이 보강된 경우는 CT형강 전단연결재가 앵커의 역할을 하여 발생할 수 있는 파괴형상(앵커강재 파괴, 앵커의 인발파괴, 콘크리트 파괴[뿔힘파괴])이 발생하지 않고, 벽체파일이 가지는 강도에 도달하였다. 따라서 합성형 벽체파일과 하부 슬래브 연결부의 강결합에 적용되어 인장에 저항하는 CT형강 전단연결재의 홀에는 관통철근을 배치하여야 한다.

5.1.2 극한강도 평가

관통철근 설치 유무에 따른 하중-변위 관계를 Fig. 11에 나타내었으며, 실험체의 극한강도를 Table 2에 나타내었다. 관통철근이 없으며 동일한 CT형강이 설치된 NO-400 실험체와 NO-500 실험체는 실험체 단면 크기에 상관없이 CT형강 전단연결재의 인발파괴가 발생하므로 유사한 극한강도를 나타내었다. 관통철근이 보강된 실험체의 경우 취약단면의 콘크리트 인장파괴가 발생하여 RE-400 실험체의 극한강도가

NO-400 실험체보다 87% 증가하였으며, 단면이 큰 RE-500 실험체에서는 관통철근 보강으로 184% 극한강도가 증가하였다. 또한, CT형강 전단연결재가 파괴되기 전까지 단면크기가 같은 시편에서는 초기 강성이 유사하였다.

식 (3)에 의한 CT형강 전단연결재의 강도를 평가하여 Table 2에 함께 나타내었다(표의 Analytical CT PR항). Perfbond rib의 강도 평가시 인발하중에 저항하는 홀의 수를 결정하여야 한다. Fig. 10(a)에 나타난 파괴형상으로부터 인장시그 하단부 바로 아래의 홀만 고려하는 경우(한 쪽 CT형강에 5개, 전체 10개)와 양쪽으로 하나씩 추가하는 경우(한 쪽 CT형강에 7개, 전체 14개)에 대해 CT형강 전단연결재의 강도를 평가하였다.

CT형강의 인발파괴가 발생한 관통철근이 없는 실험체의 경우, 홀의 수를 한 쪽 CT형강에 7개를 가정한 경우가 실험 결과와 유사함을 표로부터 확인할 수 있다. CT형강 전단연결재의 파괴가 발생하지 않은 관통철근을 보강한 실험체의

경우, 한 쪽 CT형강에 7개의 홀을 대상으로 계산된 강도가 벽체파일 인장파괴가 발생한 실험값보다 월등히 큼을 확인할 수 있다.

5.2 지지길이 변화에 따른 강도변화

CT형강 전단연결재는 관통철근이 설치된 실험체에 대해서 휨 모멘트의 영향이 반영된 2.5m의 지지점 거리에서 인발실험이 실시된 경우와 실제 조건보다 지지점 길이를 짧게 하여 인장력에 의한 영향이 대부분을 차지한다고 가정할 수 있는 지지점 거리 1.0m에서 인발실험이 실시된 경우의 파괴형상과 극한강도를 분석하였다.

5.2.1 파괴형상

실험체의 지지점 거리가 2.5m와 1.0m인 경우에 대한 파괴형상을 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 모든 실험체에서 CT형강의 인발파괴는 발생하지 않았으며, 벽체파일 자체의 콘크리트 인장파괴가 발생하였다. 따라서 CT형강 전단연

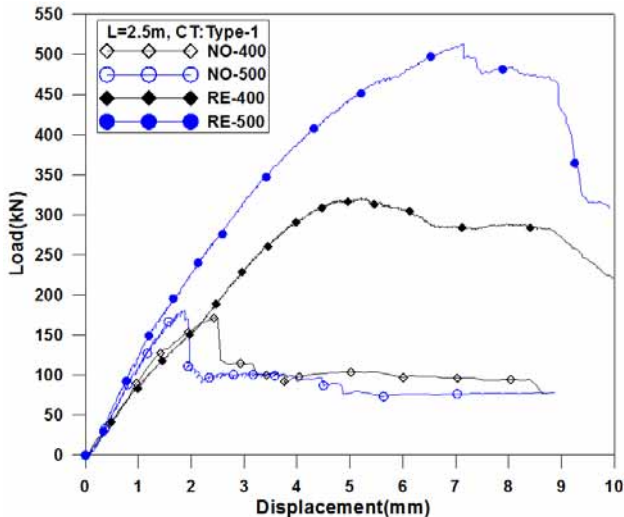


Fig. 11 Load-displacement curve without and with reinforcement

Table 2. Results of ultimate load for 1st experiment

| Classification | | Specimen Name | Ultimate load (kN) | | |
|----------------|-----------|---------------|--------------------|------------------|-----------------|
| | | | Experiment | Analytical CT PR | |
| | | | | Hole No. 5×2=10 | Hole No. 7×2=14 |
| 400x400 mm | No Reinf. | NO-400 | 172.0 | 118.0 | 165.2 |
| | D10 | RE-400 | 321.2 | 313.0 | 438.2 |
| 500x500 mm | No Reinf. | NO-500 | 180.6 | 118.0 | 165.2 |
| | D13 | RE-500 | 512.9 | 464.0 | 649.6 |



(a) 400×400 Specimen



(b) 500×500 Specimen



(c) 600×600 Specimen

Fig. 12 Failure mode with reinforcement (L=2.5m)

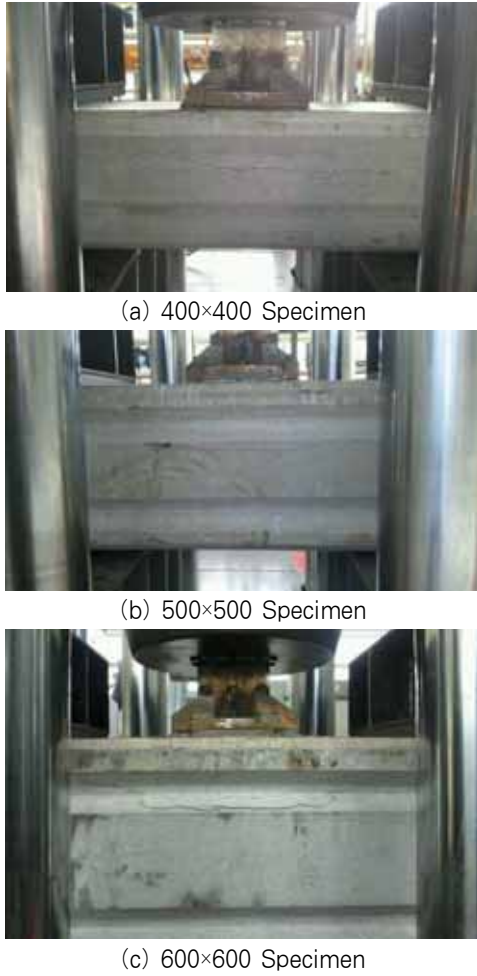


Fig. 13 Failure mode with reinforcement (L=1.0m)

결재의 강도(CT형강 인발강도)가 벽체파일 콘크리트 인장파괴 강도보다 큼을 알 수 있으며, 벽체파일과 하부 슬래브 연결부에 적용된 CT형강 전단연결재는 인장에 대해 충분히 저항할 수 있음을 확인할 수 있다.

지지점 거리 2.5m와 1.0m 실험체 모두에서 파괴면의 위치는 Fig. 5의 단면도와 비교하면 관통철근의 끝부분임을 알 수 있다. 단면적이 작은 부분은 홈이 설치된 부분이나, 관통철근이 콘크리트 인장파괴에 대해 저항을 하므로 관통철근이 없어지는 부분에서 파괴가 발생된 것으로 보인다. 또한 관통철근이 끝나는 부분의 단면 폭은 홈 부분과 큰 차이가 없다.

5.2.2 극한강도 평가

지지점 거리에 따른 실험체들의 하중-변위 관계를 Fig. 14에 나타내었으며, 하중-변위 곡선으로부터 극한강도를 평가하여 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 단, RE-500-10-2 실험체(500x500 단면을 갖으며 지지점 거리 1.0m를 갖는 두 번째 시편)은 실험 오류로 극한값이 지나치게 크게 나와서 분석에서 제외하였다. 휨의 영향이 배제된 지지점 거

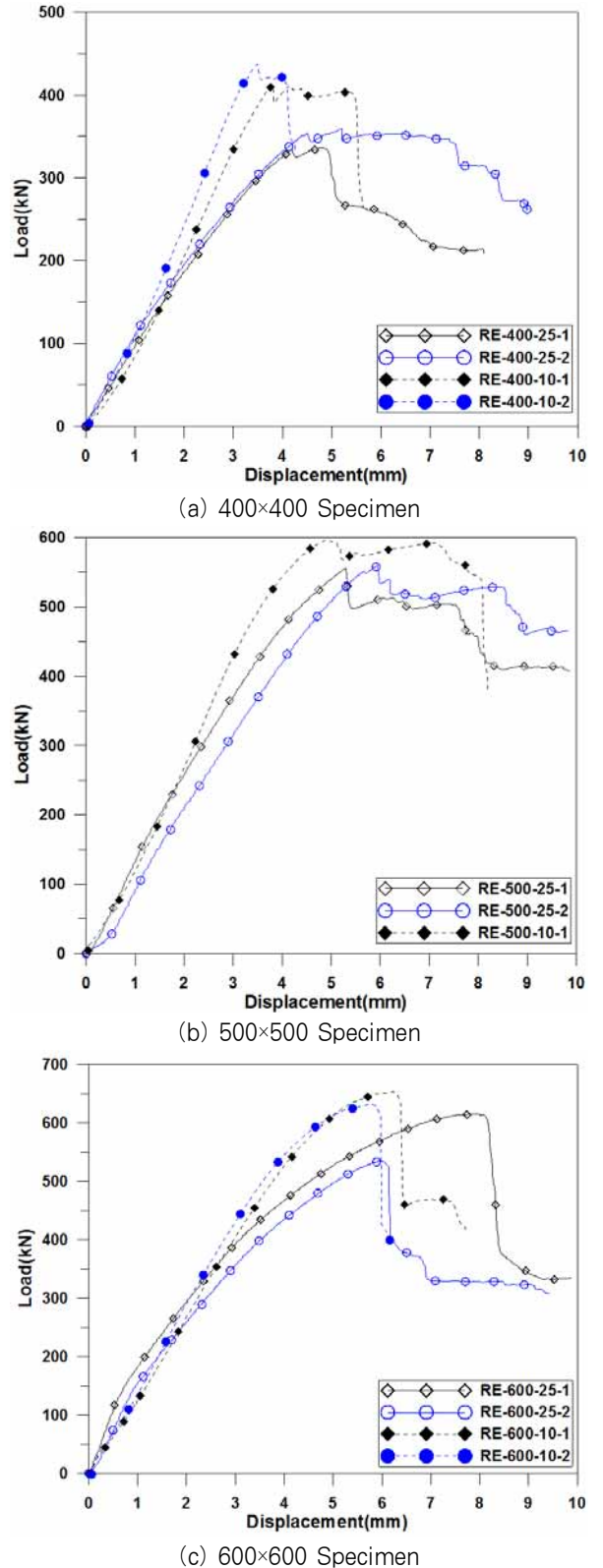


Fig. 14 Comparison of load-displacement curve

리 1.0m 실험체의 평균 극한강도는 휨의 영향이 포함된 실험체보다 400x400 실험체에서(RE-400-10-1, -2) 평균 22%, 500x500 실험체에서(RE-400-10-1) 7%, 600x600

Table 3. Comparison of ultimate load (support length=2.5m)

| Classification | Specimen name | Ultimate load(kN) | |
|----------------|---------------|-------------------|---------|
| | | Experiment | Average |
| 400x400mm | RE-400-25-1 | 336.0 | 347.4 |
| | RE-400-25-2 | 358.8 | |
| 500x500mm | RE-500-25-1 | 556.0 | 558.2 |
| | RE-500-25-2 | 560.4 | |
| 600x600mm | RE-600-25-1 | 615.2 | 575.2 |
| | RE-600-25-2 | 535.1 | |

Table 4. Comparison of ultimate load (support length=1.0m)

| Classification | Specimen name | Ultimate load(kN) | | | |
|----------------|---------------|-------------------|---------|----------------|--------------------------|
| | | Experiment | | Estimation | |
| | | Value | Average | CT PR Pull-out | Concrete Tension Failure |
| 400x400mm | RE-400-10-1 | 412.1 | 424.8 | 438.2 | 375.5 |
| | RE-400-10-2 | 437.4 | | | |
| 500x500mm | RE-500-10-1 | 596.6 | 596.6 | 856.8 | 483.3 |
| | RE-500-10-2 | -(failed) | | | |
| 600x600mm | RE-600-10-1 | 653.1 | 642.4 | 856.8 | 608.2 |
| | RE-600-10-2 | 631.6 | | | |

실험체에서(RE-600-10-1, -2) 평균 12% 증가되는 것으로 나타났다. 또한, 휨의 영향이 배제된 실험체들이 극한강도 도달 후 급작스럽게 파괴되는 경향이 상대적으로 크게 나타났다.

휨에 의한 영향이 거의 없는 지지점 거리 1.0m의 결과를 나타내는 Table 4에는 실험체의 예측 강도를 같이 나타내었다. CT형강 전단연결재의 강도(CT형강 인발강도)는 한 쪽 CT형강에 7개의 홈이 인발에 저항한다고 가정한 경우에 대해 계산된 강도이다.

인장파괴시의 강도 추정은 정확히 예측하기가 어려우므로 본 연구에서는 단순히 실험체 파괴면의 면적을 가정하고 가정된 면적에 프리스트레스 콘크리트의 균열응력을 곱하여 실험체의 인장강도를 평가하였다. Fig. 13의 파괴형상과 Fig. 5의 단면도를 비교하여 파괴면의 위치는 관통철근이 끝나는 부분으로 가정하였으며, 파괴면의 면적은 파괴면 위치에서 중공 부분을 제외한 단면 순폭과 수평 파괴면의 길이를 곱하여 산출하였다. 파괴면 길이는 Fig. 13에서 알 수 있듯이 실험

체마다 차이가 있지만, 인장지그의 끝단에서 파괴면 위치까지 30°로 확장된 부분을 포함한 인장지그 아래 부분의 길이로 단순하게 가정하였다. 단, 경사진 파괴면의 영향을 무시하였다. 프리스트레스 콘크리트의 균열응력은 실험으로부터 얻어야 하나, 본 연구에서는 설계기준의 균열응력(파괴계수) 값인 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 를 적용하였다.

400×400 실험체의 경우, 실험에 의한 극한강도가 CT형강의 인발파괴 강도의 97% 수준으로 평가되어 인발파괴의 발생 가능성은 존재하나, Fig. 13(a)에 나타난 파괴형상은 CT형강의 인발파괴가 아닌 콘크리트의 인장파괴가 발생하였음을 나타내므로 실험체의 취약 단면에서 먼저 콘크리트 인장파괴가 먼저 발생하였다고 판단된다. 500×500 실험체와 600×600 실험체에서는 CT형강 전단연결재의 강도가 벽체 파일 콘크리트의 실험에 의한 극한강도보다 크게 평가되므로 CT형강의 인발파괴는 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 단순한 파괴면 가정을 통해 예측된 콘크리트 인장파괴 강도에 비해 측정된 실험체의 평균 극한강도는 400×400 실험체에서 13%, 500×500 실험체에서 23%, 600×600 실험체에서 6% 큰 것으로 나타났다. 이는 실험시 콘크리트의 압축강도와 설계 압축강도(80MPa)의 차이와 가정된 콘크리트 파괴면과 실제 파괴면의 면적 차이 등에 기인한다. 그러나 본 연구에서 적용한 파괴형상으로부터 단순히 파괴면의 면적을 가정하여 인장강도를 추정하는 방법은 설계 적용 목적으로 충분한 안전측의 결과를 산출할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 합성형 벽체파일과 하부 슬래브 연결부에 적용되어 합성 거동을 위한 전단연결재 역할뿐만 아니라 인장력에 저항하는 앵커의 역할을 수행하는 CT형강 전단연결재의 성능을 검증하기 위하여 실험 크기의 다양한 실험체를 제작하여 직접 인발실험을 실시하였다. 실험체들의 파괴형상과 극한강도 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CT형강 전단연결재에 관통철근을 설치하지 않은 실험체에서는 CT형강의 전단저항 부족으로 CT형강의 인발파괴가 발생하였으며, 관통철근이 설치된 실험체에서는 CT형강의 인발파괴와 콘크리트 뿔힘파괴 없이 벽체파일 취약단면에서 콘크리트 인장파괴가 발생하였다. 관통철근 설치로 400×400 실험체에서는 극한강도가 87% 증가하였으며, 500×500 실험체에서는 184% 증가하므로 하부 슬래브와 강결합으로 연결되는 부분에 위치하는 CT형강 전단연결재 홈에는 관통철근을 설치하여 강도를 증가시켜야 한다.

- (2) 관통철근이 설치된 실험체들을 대상으로 휨의 영향이 반영된 지지점 거리(2.5m)와 실제 현장 조건보다 보수적으로 지지점 거리(1.0m)를 가정하여 실험을 수행하여 파괴 형상을 분석한 결과, 실험체들은 CT형강의 인발파괴 없이 벽체파일 자체의 인장파괴를 보여주므로 적용된 CT형강은 인장력에 대해 충분히 저항한다고 판단된다. 또한, 휨의 영향이 배제된 실험체의 평균 극한강도는 휨의 영향이 포함된 실험체보다 400×400 실험체에서 22%, 500×500 실험체에서 7%, 600×600 실험체에서 12% 증가하였다.
- (3) 실험체 파괴형상과 위치로부터 파괴면을 가정하여 평가된 실험체의 콘크리트 인장 강도는 실험체의 극한강도보다 400×400 실험체에서 13%, 500×500 실험체에서 23%, 600×600 실험체에서 6% 작은 것으로 평가되었다. 그러므로 적용된 방법은 합성형 벽체파일의 인장강도 예측에 안전측의 결과를 줄 수 있는 방법이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(313-2008-2-D01094)이며, 또한 포항산업과학연구원 강구조연구소의 협조로 이루어졌습니다. 이에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌(References)

- [1] 마호성, 원정훈, 조효상(2012) PHC파일과 CT형강을 합성한 합성형 벽체파일의 휨거동에 대한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제2호, pp.233-243. Mha, H.S., Won, J.H., and Cho, H.S. (2012) A Study on Flexural Behavior of Composite PHC Pile with CT Structural Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 2, pp.233-243 (in Korean).
- [2] Zellner, W. (1987) Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors, *Proceedings of ASCE/IABSE Engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete*, pp.240-252.
- [3] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1994) A Parametric Study of Perfobond Rib Shear Connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp.614-625.
- [4] 김상호, 윤지현, 최우진, 김준환, 안진희(2011) 일체식교

대 강교량의 거더-교대 연결부 상세의 거동평가를 위한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제1호, pp.61-72.

- Kim, S.H., Yoon, J.H., Choi, W.J., Kim, J.H., and Ahn, J.H. (2011) Experimental Study for Performance Evaluation of Structural Details of Girder-abutment Joint in Integral Abutment Steel Bridge, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 1, pp.61-72 (in Korean).
- [5] 김상호, 이찬구, 윤지현, 원정훈(2009) Perfobond Rib을 적용한 강-PSC 혼합구조 연결부의 거동 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제6호, pp.647-657. Kim, S.H., Lee, C.G., Yoon, J.H., and Won, J.H. (2009) Behaviors of Joint with Perfobond Rib Shear Connectors in Steel-PSC Hybrid System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 6, pp.647-657 (in Korean).
- [6] 한국콘크리트학회(2010) 콘크리트용 앵커설계법 및 예제집, 기문당. Korea Concrete Institute (2010) *Design and Examples for Concrete Embedded Anchor*, Kimoondang (in Korean).
- [7] 박용명, 전명희, 이건준, 김철환(2011) 인장하중을 받는 중대형급 선설치 앵커볼트의 콘크리트파괴강도 평가를 위한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제4호, pp.493-501. Park, Y.M., Jeon, M.H., Lee, K.J., and Kim, C.H. (2011) A Study on the Concrete Breakout Capacity Evaluation of Medium-to-large size CIP Anchor Bolts under Tension Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 4, pp.493-501 (in Korean).
- [8] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1995) Tests of Full-size Composite Beams with Perfobond Rib Connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp.80-92.
- [9] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1997) Numerical Analysis of Push-out Specimens with Perfobond Rib Connectors, *Computers and Structures*, Vol. 62, No. 4, pp.617-624.
- [10] Sara, B.M. and Bahram, M.S. (2002) Perfobond Shear Connectors for Composite Construction, *Engineering Journal*, first quarter, pp.2-12.
- [11] Valente, I. and Cruz, P.J.S. (2004) Experimental Analysis of the Perfobond Shear Connection between Steel and Lightweight Concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, No. 3-5, pp.465-479.
- [12] Ahn, J.H., Kim, S.H., and Jeong, Y.J. (2008)

- Shear Behaviour of Perfobond Rib Shear Connector under Static and Cyclic Loadings, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 60, No. 5, pp.347-357.
- [13] Ahn, J.H., Lee, C.G., Won, J.H., and Kim, S.H. (2010) Shear Resistance of the Perfobond-rib Shear Connector Depending on Concrete Strength and Rib Arrangement, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, No. 10, pp.1295-1307.
- [14] Candido-Martins, J.P.S., Costa-Neves, L.F., and Vellasco, P.C.G.S. (2010) Experimental Evaluation of the Structural Response of Perfobond Shear Connectors, *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 8, pp.1976-1985.

요 약: 본 연구에서는 합성형 PHC 벽체파일의 CT형강 전단연결재가 벽체파일과 하부 슬래브와의 연결부에서 인장력에 저항하는 앵커의 성능을 갖는지 직접 인발실험을 통해 분석하였다. 다양한 실물 크기 실험체들의 파괴형상과 하중-변위 곡선으로부터 CT형강의 인발파괴를 방지하기 위해서는 CT형강 복부 홀에 관통철근을 배치하여 강도를 증가시켜야 함을 알 수 있다. 관통철근이 설치된 다양한 단면의 실험체들을 대상으로 지지점 거리를 변화시켜 파괴형상과 극한강도를 분석한 결과, CT형강의 인발파괴 전에 벽체파일 자체의 콘크리트 인장파괴가 모든 실험체에서 발생하므로 적용된 CT형강 전단연결재는 벽체파일과 하부 슬래브 연결부의 발생 인장력에 대해 충분히 저항할 수 있다.

핵심 용어: 합성형 PHC 벽체파일, CT형강 전단연결재, 하부 슬래브, 연결부, 인발실험, 관통철근
