Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 33, No. 3: 889~900, May 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.3.889

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Concrete Engineering **콘크리트공학**

프리캐스트 콘크리트 트러스 시스템의 압축 내하력 실험 연구

한만엽* · 전세진**
Han, Man-Yop*, Jeon, Se-Jin**

An Experimental Study on Compressive Loading Capacity of Precast Concrete Truss System

ABSTRACT

In a large scale of excavation for the foundation of large-sized structures and underground structures, a considerable amount of earth pressure can occur. Steel beams that have been used to form a temporary structure to support earth pressure may be less economical and less efficient in resisting the high earth pressure. To cope with this problem, PCT(Precast Concrete Truss) system has been devised and investigated both experimentally and analytically. A proper connection method between the concrete truss members was proposed to accommodate fast assembly and disassembly. Full-scale test of PCT system was performed to verify the load-carrying capacity of the PCT system including the connections. The test results were compared with those of structural analysis. The test specimen which corresponds to PCT strut attained the ultimate load without buckling, but the detail of connector members needs to be improved. It is expected that precast concrete truss members can be efficiently incorporated into a temporary structure for deep and large excavation by replacing conventional steel beams.

Key words : PCT(Precast Concrete Truss) system, Precast concrete, Temporary earth retaining structures

초 록

대형 구조물의 기초나 지중 구조물 시공을 위한 대규모 굴착 시 매우 큰 토압이 발생할 수 있다. 이러한 큰 토압을 지지하기 위해 기존에 사용되어 온 강재 버팀보를 적용할 경우 경제성 및 효율성이 저하될 우려가 있다. 이러한 점을 개선하기 위해 PCT(Precast Concrete Truss) 시스템을 고안하였으며 이에 대한 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 콘크리트 트러스 부재의 조립 및 해체를 용이하게 하기 위해 적절한 연결방법이 제안되었다. 이러한 연결부를 포함한 PCT 시스템의 내하력을 검증하기 위해 실대형 실험이 실시되었으며, 실험결과는 구조해석결과와도 비교되었다. PCT 버팀보를 모사한 시험체는 극한하중 도달 시까지 좌굴이 발생하지 않았으나, 연결 부재 상세에 대한 일부 개선점이 도출되었다. PCT 시스템은 대규모 굴착 시 기존의 강재 버팀보를 대체하는 가설구조물로서 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : PCT(Precast Concrete Truss) 시스템, 프리캐스트 콘크리트, 흙막이 가시설

1. 서 론

지금까지 국내외에서 구조물 기초나 지중 구조물 시공을 위한 지반 굴착 시 흙막이 벽을 지지해 주는 가설구조물(Korea Expressway Corporation, 2005)을 구성하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 H 형강이나 강관 등 강재가 주로 사용되어 왔다. 토질이 양호하거나 소규모 굴착이어서 토압이 작은 경우에는 이처럼 강재를 활용하여 흙막이 가설구조물을 설치하는 것이 경제적일 수 있다. 하지만 토질이

* 정회원 · 아주대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사 (myhan@ajou.ac.kr)
** 정회원 · 교신저자 · 아주대학교 건설시스템공학과 조교수, 공학박사 (**Corresponding Author** · Ajou University, Assistant Professor · conc@ajou.ac.kr)

Received August 21 2012, **Revised** November 5 2012, **Accepted** March 7 2013

Copyright ⓒ 2013 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

불량하거나 대규모 굴착면의 하부와같이 토압이 큰 경우 강재를 사용한 가설구조물은 보강 강재 및 버팀보의 대형화 및 밀집 현상 등으로 인해 시공성이 저하되고 비경제적일 우려가 있다. 이러한 재래식 버팀보 공법에 대한 대안으로 조립식 스트럿(strut) 공법, PS(PreStressing) 흙막이 공법 등이 제안된 바 있으나 역시 나름의 단점들이 있어 활성화되지는 못한 실정이다(Han 등, 2009).

이러한 단점들을 개선하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 H 형강에 강선을 배치하고 프리스트레스를 도입하여 H 형강의 휨 저항력을 대폭 증가시킴으로써 띠장의 받침 길이, 즉, 버팀보의 간격을 기존보다 수배 증가시킨 IPS(Innovative Prestressed Support) 시스템이 최근 개발된 바 있다(Han 등, 2007; Kim 등, 2006). 한편, 중국에서는 철근콘크리트를 이용한 가설구조물 공법으로 Fig. 1(c)와 같은 CTS(Concrete Truss System) 공법이 시도된 바 있는데 이는 주로 현장타설 콘크리트로 시공된다(Han 등, 2009). 따라서 철근조립 및 양생 등 시공기간이 길어지고 폭파 공법 또는 브레이커를 이용한 해체 시 소음, 진동 및 분진이 유발되어 환경에 불리한 영향을 미치므로 기존 강재 가설구조물보다 큰 장점을 찾기 어렵다.

(a) Conventional strut system

(b) IPS (Innovative Prestressed Support) system

(c) CTS (Concrete Truss System)

Fig. 1. Existing construction methods for temporary earth retaining structures

이상의 사례를 분석해 볼 때 강재 가설구조물을 이용한 공법의 경우 비록 최근에 기존의 공법들을 개량한 신공법들이 제안되기도 했지만, 특히 해안가나 강가 등의 연약지반에 시공되는 구조물의 기초 또는 대심도 구조물의 경우 대규모 굴착에 수반되어 매우 큰 토압이 작용하게 되므로, 이에 대응하여 고가의 강재를 다량 사용하는 것은 경제성이 현저히 저하될 우려가 있다. 한편 일부 해외에서 시도된 콘크리트 가설구조물 공법의 경우에도 이를 현장타설 철근콘크리트로 시공할 경우 강재와 비교할 때 재료비 자체의 절감 효과는 있으나 기타의 불리한 점들이 이러한 장점들을 상당부분 상쇄하고 있다고 사료된다.

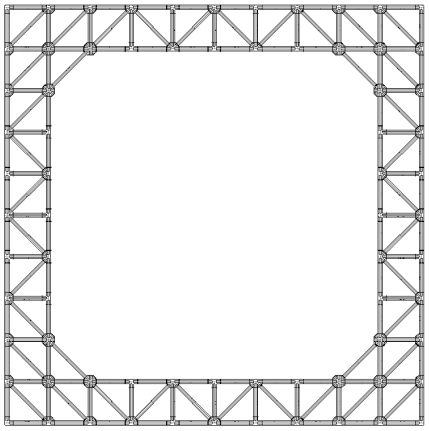
따라서 이 연구에서는 대규모 굴착 현장 및 토압이 큰 굴착 현장에서 시공성이 뛰어나고 경제적인 가설구조물 시공을 실시하기 위해 프리캐스트 콘크리트 트러스 부재를 이용하여 조립과 해체가 용이한 흙막이 벽 지지 공법인 PCT(Precast Concrete Truss) 시스템이 개발되었다(Han 등, 2008; Han 등, 2009). 현재까지 단일 철근콘크리트 및 프리캐스트 콘크리트 부재의 압축거동에 대한 많은 연구가 이루어졌으며(Han 등, 2009; Hong 등, 2006; Park 등, 2008), 근래에 들어 바닥판이나 교각을 중심으로 프리캐스트 콘크리트를 활용한 조립식교량 연구도 활발히 진행되고 있다(Cho 등, 2011; Chung 등, 2007; Lee 등, 2011; Won 등, 2011). 하지만, 이 연구와 같이 프리캐스트 콘크리트 트러스 부재 시스템을 구성하고 이를 가시설과 같은 실제 구조물에 적용하려는 연구는 미흡하였다고 생각된다.

이 논문에서는 제안된 PCT 시스템을 모사하기 위해 프리캐스트 콘크리트 트러스 부재들을 제작하여 적절한 방법으로 연결한 후 실대형 실험을 통하여 내하력을 검증하고 그 적용성과 개선점을 도출해 보았다.

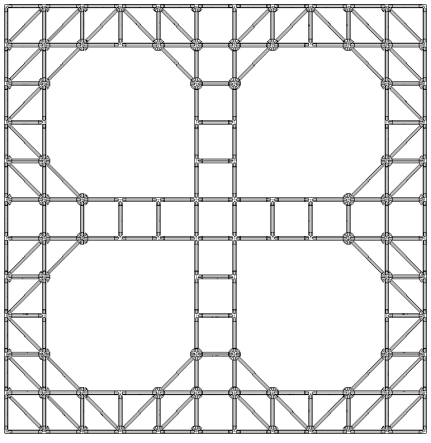
2. PCT 시스템

2.1 개 요

PCT(Precast Concrete Truss) 시스템은 상기의 문제점들을 효과적으로 개선하고자 제안된 것으로, 공장에서 미리 제작된 프리캐스트 콘크리트 세그먼트들을 Fig. 2(a)와 같은 형태로 다수 연결하여 트러스 구조를 구성함으로써 굴착면의 토압을 받는 벽체를 지지하도록 한 것이다. 이를 Fig. 1(a)와 같이 강재 버팀보를 이용한 기존 공법과 비교해 보면, 내부 공간의 활용도가 크게 향상될 수 있음을 알 수 있다. 또한 강재보다 저렴한 콘크리트를 사용하여 경제성이 높으며, 공장 제작의 프리캐스트 콘크리트를 사용하여 고품질을 확보하고 현장에서 용이하게 조립 및 해체가 가능하므로 공사기간이 단축되는 장점도 있다. 부연설명하자면, Fig. 2(a)는



(a) Type 1 (Wales only)



(b) Type 2 (Wales and struts)

Fig. 2. Examples of PCT (Precast Concrete Truss) system

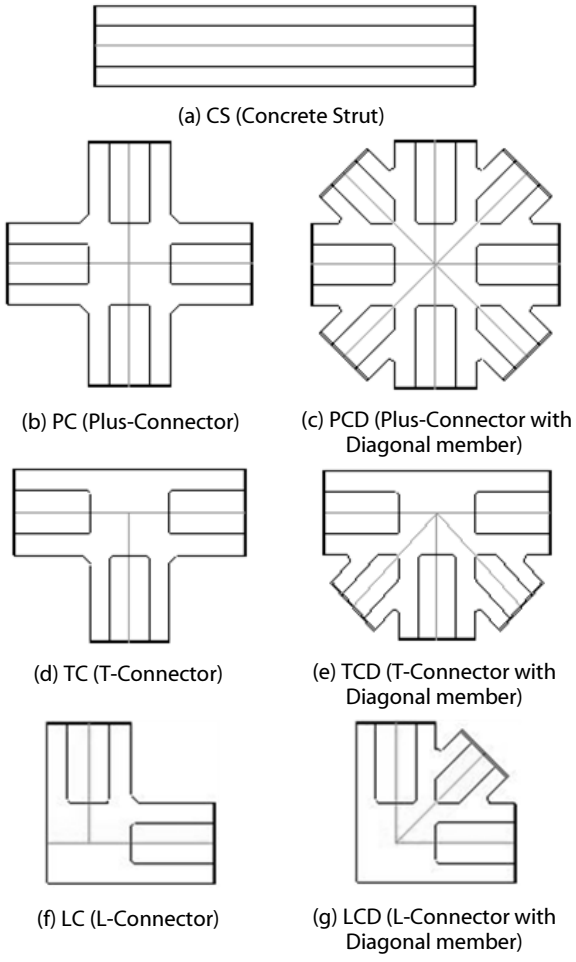


Fig. 3. Component members of PCT system

토압이 보통 수준인 경우로서 흙막이 벽을 지지하는 띠장에 본 PCT 시스템을 적용하여 토압을 지지한 것이며, PCT 띠장 시스템 자체의 내하력이 크기 때문에 별도의 버팀보를 필요로 하지 않는 경우로 볼 수 있다. 다만, 압축에 강하고 인장에 약한 콘크리트의 특성 상 대부분의 트러스 부재에 압축력이 작용하도록 부재를 배치하는 것이 바람직한데, 큰 토압이 작용할 경우에는 Fig. 2(a)의 형태로 토압을 지지하게 되면 벽체를 지지하는 띠장 트러스의 일부 부재들에 인장력이 발생할 가능성이 있다. 이 경우에는 Fig. 2(b)의 시스템과 같이 중간에 트러스 버팀보를 설치함으로써 띠장 트러스의 인장력을 감소시키는 구조체를 구성하여 대처할 수 있다.

이처럼 PCT 요소 부재들을 결합하여 트러스 시스템을 구성하고 흙막이 가시설로 사용할 경우 요소 부재들에 작용하는 힘이 주로 압축력이 되도록 부재를 구성함이 바람직하다. 하지만 이러한 경우에도 일부 부재들에는 불가피하게 인장력이 작용할 수도 있는데, 이 경우에는 전체 트러스 시스템에 대한 구조해석을 수행하고 인장력이 비교적 크게 발생하는 요소 부재들에는 긴장재를 삽입하여 프리스트레스를 가함으로써 인장력에 약한 콘크리트의 단점을 보완할 수 있다.

2.2 요소 부재

PCT 시스템 개발 시 요소 부재들을 정형화하여 조립의 용이성을 높이고, 대량 생산성 및 재활용성도 제고하고자 하였다. PCT 시스템의 요소 부재는 Fig. 3과 같이 기본이 되는 CS(Concrete Strut) 부재와 연결 부재로서 '+자', 'T자', 'L자'로 연결할 수 있는 PC, TC, LC 부재 및 '+자', 'T자', 'L자' 부재에 사재를 추가로 연결한 PCD, TCD, LCD 부재로 구성된다. CS 부재는 필요에 따라 4, 6, 8 및 10m 길이의 부재 중 선택하여 사용할 수 있도록 규격화하였다. 이러한 PCT 요소 부재들에는 2.1절에서 언급하였듯 유사 시 필요한 긴장재의 삽입을 위한 구멍들을 적절한 위치에 마련해 놓을 수 있다.

한편, 요소 부재의 단면 형상은 원형, 사각형, 팔각형 등 여러 가지 형상 중 선택할 수 있도록 했으며, 공통적으로 단면 가운데

중공을 형성하여 재료비를 절감하고 부재 중량을 감소시켰다. 또한 PCT 부재 간의 연결부에는 단면 바깥쪽에 강판을 부착하고 볼트 구멍을 두어 부재들 간에 볼트로 연결할 수 있게 하였다. 프리캐스트 부재를 연결하는 여러가지 방식 중에 이러한 방식을 채택한 근본적인 이유는 다른 방식에 비해 조립과 해체가 용이하여 급속 시공의 장점을 극대화시킬 수 있고 부재의 재활용성도 염두했기 때문이다. 연결부에서는 전단에 대한 추가적인 안전성 확보를 위해 필요시 전단키를 둘 수도 있다.

2.3 요소 부재들의 결합

Fig. 3의 요소 부재들을 적절히 결합하여 Fig. 4에서 예로 든 것과 같은 다양한 형태의 트러스 시스템을 구성할 수 있다. 트러스 부재는 그 위치에 따라 토압을 지지하고 있는 강널말뚝(시트 파일(sheet pile))이나 버팀기둥을 직접 지지하고 있는 띠장 역할을 하기도 하고, 띠장을 지지하는 버팀보 역할도 하게 된다. 실제 현장 적용 시에는 토압이 PCT 부재들에 유발하는 부재력의 크기를 산정하여 이것이 PCT 부재들의 내력을 초과하지 않도록 PCT 요소 부재들을 구성해야 한다. Fig. 4에서 부재 간의 접합부는 일반적인 트러스의 힌지(hinge) 접합보다는 강절 접합에 가깝게 거동하게 된다.

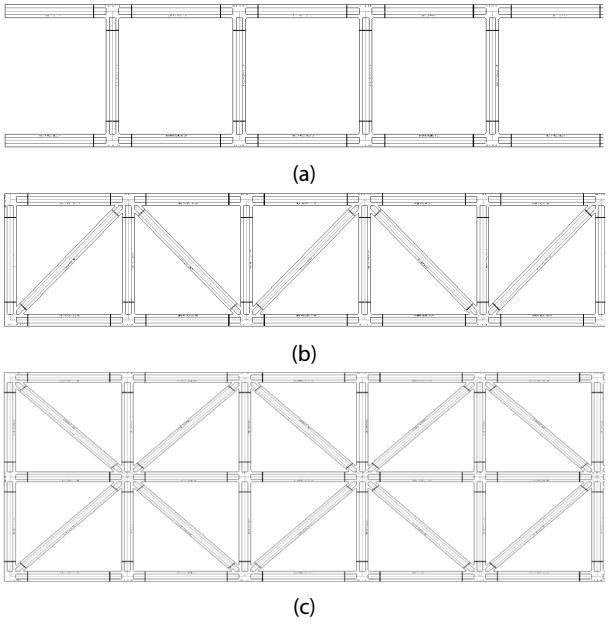


Fig. 4. Examples of assembly of PCT component members

3. PCT 시험체 설계 및 해석

3.1 시험체 설계

이 실험의 부재 설계는 실제 규모의 가설구조물의 일부를 가정하여 Fig. 5와 같이 구성하였고, Fig. 3(a)의 CS, 즉, 기본 트러스 부재는 길이 4m, 단면 형상은 400mm×400mm의 사각형으로 하였다. 또한 단면 가운데의 중공의 지름은 140mm로 하였다. 이는 주로 Fig. 2(b)에서 큰 압축력을 받는 트러스 버팀보를 모사하는 시스템으로 볼 수 있으며, Fig. 4(a)의 변형으로도 볼 수 있다. 이러한 부재 구성에서 인장력을 크게 받는 부재는 없을 것으로 예상되므로 긴장재를 삽입하지는 않았으며, 따라서 단면 내에 긴장재가 통과할 수 있는 구멍은 생략하였다. 또한, 연결부에서 전단력이 크게 발생하지는 않는 부재 구성이므로 연결부의 전단키도 생략하였다.

다양한 형태의 PCT 시스템 중에서 이와 같은 시험체를 구성하게 된 이유를 부연설명하자면 다음과 같다. 이 연구에서 개발한 PCT 시스템은 주로 대규모 굴착에서 토압이 큰 경우에 대한 경제성 확보를 목표하고 있으므로, 이 경우에는 Fig. 2(b)와 같은 시스템이 주로 적용되게 된다. 이 경우에도 한개의 PCT 버팀보가 지지할 수 있는 압축력이 매우 크기 때문에 Fig. 1(a)와 같은 기존의 재래식 강재 버팀보 공법과 비교할 때 버팀보의 개수가 최소화되어 경제성 및 공간활용성이 향상된다는 장점이 있다. 이처럼 PCT 버팀보의 압축 내하력이 커질 수 있는 이유중의 하나는 종방향의 PCT 버팀보 부재들을 브레이싱 역할을 하는 PCT 횡방향 부재들이 연결하고 있으므로 좌굴에 대한 지지 길이가 작아지기 때문으로 볼 수 있다. Fig. 2(b)와 같은 PCT 시스템에서는 PCT 띠장보다는 매우 큰 압축력을 지지하는 PCT 버팀보가 더 중요한 역할을 하리라 생각되며, 이 때의 주요 관건은 버팀보 자체의 압축 내하력 및 좌굴을 방지하는 브레이싱의 역할을 검증하는 것이라 사료된다. 따라서, Fig. 5와 같은 PCT 버팀보 시스템을 본 실험 대상으로 선택하게 된 것이다.

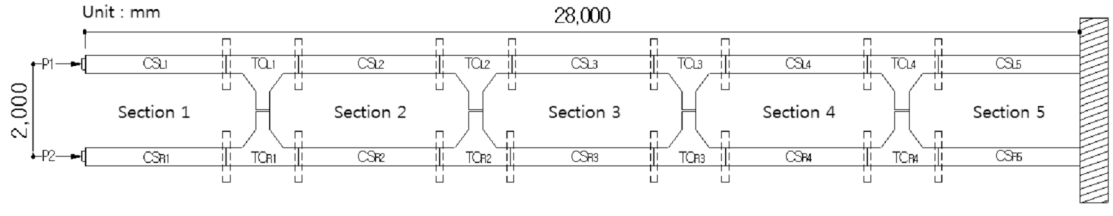


Fig. 5. Plan view of the full-scale PCT test specimen

뒤에서 언급할 Fig. 10 및 11에 나타내어진 CS 및 TC 부재 각 단면의 설계 축하중은 식 (1)을 적용하여 구했으며, 그 계산결과를 Table 1에 나타내었다(Korea Concrete Institute, 2012; Shin 등, 2013). 식 (1)을 적용한 이유는 본 시험체의 주요 단면이 부재축 방향의 압축부재로 거동할 것으로 예상되기 때문이다.

$$P_d = \phi P_n = 0.8\phi\{0.85 f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\} \quad (1)$$

여기에서, f_{ck}는 콘크리트 설계기준강도, f_y는 철근 항복강도, A_g는 콘크리트 트러스 단면적, A_{st}는 철근을 포함한 강재의 단면적이고, 계수 0.8은 압축부재에서 발생할 수 있는 최소 편심을 반영한 것으로 나선철근이 아닌 띠철근으로 보강한 압축부재에 해당하는 감소계수이다. 또한 강도감소계수 ϕ는 띠철근 보강 부재에서 0.65를 적용한다. 각 기호에 해당하는 값들은 뒤에 나올 Table 2를 참조하도록 한다. TC 부재는 강판 및 L형강으로 보강되어 있는 형태이며, 따라서 Table 1은 B-B' 단면에서의 SS400 강판(400mm ×10mm)과 C-C' 단면에서의 SS400 L형강(80mm×80mm)의 기여분을 고려하여 설계 축하중을 계산한 결과이다. D-D' 단면에서는 콘크리트 단면적이 감소되어 상대적으로 작은 설계 압축력이 산출되었다.

3.2 PCT 시스템의 구조해석

실험에 앞서 사전 검증의 의미로 시험체에 대한 구조해석을 실시하였다. Table 1에서 구한 본 PCT 시험체 주요 단면의 설계 압축력을 참조하여, 시험체 양쪽에 각각 1,900kN씩 총 3,800kN의 하중을 가하여 해석을 수행하였다. 이 때 Table 1의 설계 압축력이 각종 감소계수를 반영한 것임을 고려하면, 설정된 최대 재하하중까지 시험체에 파괴가 발생하지 않을 것으로 예상되어 실제 실험에서도 이러한 방식으로 재하하였다. 하지만, 단면들 중 TC3(D-D') 단면의 설계 압축력이 가장 작으므로 TC3 단면에서의 파괴 가능성이 상대적으로 높은 것은 사실이며 뒤에서 보듯 실제 실험에서도 이러한 경향이 나타났다.

이 연구에서 구조해석을 통한 사전 검증은 첫째, 구조물의 변위나 변형률을 사전에 예측하여 LVDT(Linear Variable Differential Transformer, 변위계)나 변형률 게이지를 설치할 주요 부위를 선정하기 위해, 둘째, 해석결과와 실험결과의 비교를 통해 해석과 실험의 정밀도를 상호 검증하기 위해, 셋째, 실험 중 시험체에 좌굴이 발생하지 않을 지 예측하기 위해 수행되었다.

상기의 목적으로 Fig. 5와 같은 시험체의 구조해석을 위해 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석은 Table 2의 단면 제원 및 물성값을 입력하여 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS(MIDAS Information Technology, 2012)를 이용하여 수행하였다. 유한요소해석은 선형탄성이론에 근거하였고 일반적인 하중해석과 더불어, 좌굴 모드들에 따른 좌굴 하중들을 산정하여 설정된 최대 재하하중 하에서 좌굴이 발생할지의 여부를 판정하기 위한 고유치 해석(eigenvalue analysis)을 실시하였다.

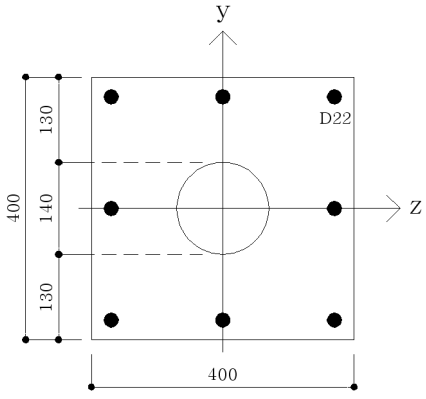
그러나 예상대로 Fig. 5의 시험체는 6m 이하의 간격으로 횡지지된 형태이므로 최소 좌굴 하중의 크기가 실제 최대 재하하중을 크게 상회하므로 좌굴은 발생하지 않을 것으로 예측되었다. 한편, "흙막이 가시설 세부설계기준"(Korea Expressway Corporation, 2005)에서 버팀보에 대한 규정을 살펴보면 주로 좌굴 방지에 대한 규정이 제시되어 있으며, 이를 위해 세장비($\lambda = kl/r$)가 100 이하여야 한다고 명시하고 있다. 여기에서, k는 유효길이 계수이고,

Table 1. Design compressive force for each section

Section	Design compressive force (kN)
CS (A-A')	1,949
TC1 (B-B')	1,949
TC2 (C-C')	2,093
TC3 (D-D')	1,748

Table 2. Section details and material properties

Section details (mm)



Material and section properties

Specified compressive strength of concrete, f_{ck} (MPa)	21	Second moment of inertia, I_{yy} and I_{zz} (mm^4)	2.11×10^9
Yield strength of reinforcing bars, f_y (MPa)	400	Gross area of concrete, A_g (mm^2)	144,226
Modulus of elasticity of concrete, E_c (MPa)	26,114	Total area of reinforcing bars, A_{st} (mm^2)	3,097
Modulus of elasticity of reinforcing bars, E_s (MPa)	200,000	Reinforcement ratio, ρ(%)	2.1

l은 기둥의 비지지 길이, r은 단면이차반경이다. Fig. 5에서 TC 부재들은 횡지지 역할을 하고 있으므로 이를 고려하여 Fig. 5의 각 구간의 세장비를 구해보면 다음과 같다. 각 구간에서 TC 부재가 위치한 곳은 고정단과 힌지의 중간 거동을 할 것으로 예상되나, 안전측으로 힌지로 보고 계산하였다. 단, 1구간의 좌측은 자유단으로 가로흔들림(sidesway)이 있다고 보아야 하므로, 우측까지 힌지로 보면 불안정하게 되기 때문에 이 때에만 우측을 고정단으로 가정하였다. 이를 고려한 유효길이 계수는 1구간의 경우 2, 2~4구간의 경우 1이다. Table 2의 단면 상수를 참고하여 계산해보면 1구간의 세장비는 83, 2~4구간의 세장비는 50으로, 기준상의 100 이하 규정을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다. 5구간은 2~4구간의 세장비 이하의 값을 갖는다. 이상은 좌굴해석 결과와도 부합하는 결과이다.

Fig. 6. Finite element modeling of the PCT test specimen

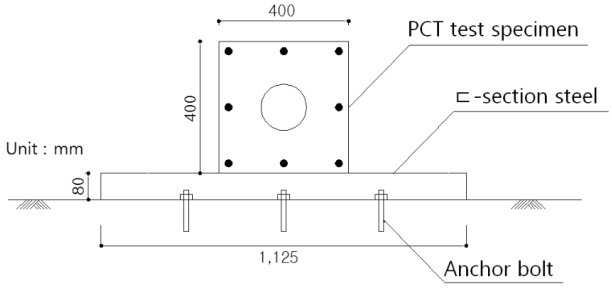


Fig. 7. Installation of supports (ㄷ-section steel)

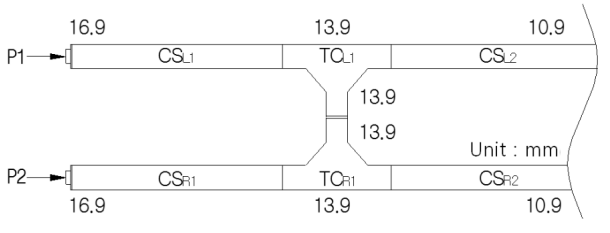


Fig. 8. Longitudinal displacements near the loading points

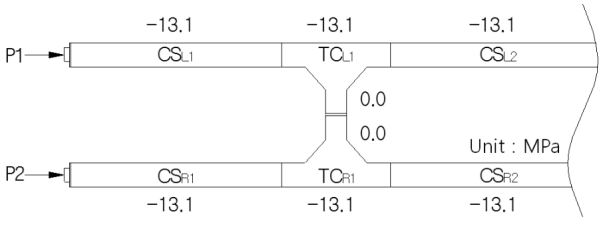


Fig. 9. Longitudinal compressive stresses near the loading points

한편 하중해석 모델링 및 결과를 요약하면 다음과 같다. Fig. 6과 같이 모든 요소는 보(beam) 요소로 모델링하였고, 경계 조건 설정 시 지점부는 실제 상세에 가깝도록 변위는 모든 방향으로 구속시키되 회전은 허용하였다. 트러스 요소가 아닌 보 요소로 모델링한 이유는 앞서 기술하였듯 본 PCT 시스템의 접합부가 실제로는 힌지보다는 강절 접합에 가깝게 거동할 것으로 예상되기 때문이다. 또한 실제 현장에서의 상황을 반영하여 Fig. 7과 같이 PCT 시험체와 바닥면의 마찰을 최소화함으로써 순수한 축하중이 작용되도록 PCT 시험체의 아랫 부분에 받침부로 ㄷ-형강(200mm ×85mm)을 앵커볼트로 고정시켰다. Fig. 5와 같이 받침부는 TC 부재와 CS 부재의 접합부마다 1개 씩 설치하였다. 해석 시 받침부 위치에서는 수직 방향으로만 변위를 구속시켰다.

Fig. 8 및 9는 해석결과의 예로서, Fig. 5의 하중이 작용하였을 때 하중 가력점 부근의 CS 및 TC 부재에서 발생하는 변위 및 압축응력을 나타낸 것이다. P1 및 P2에 각각 1,900kN의 하중이 재하되었을 때 종방향 변위는 실제 실험에서 종방향 LVDT를 설치한 TC_{L1} 및 TC_{R1} 위치(가력점에서 4.8m 떨어진 지점)에서 13.9mm가 발생했으며, 압축응력은 모든 요소에서 13.1MPa로 나타났다.

4. 실대형 PCT 실험

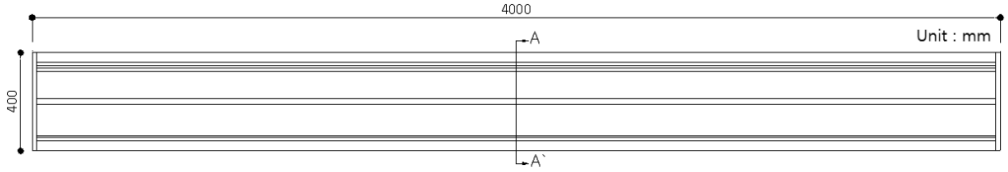
4.1 실험 개요

이 실험에서는 프리캐스트 콘크리트 부재를 트러스화하여 버팀보를 형성했을 때 버팀보에 압축력이 작용하면 트러스 버팀보의 부분 또는 전체적인 압축 및 좌굴 거동(Chajes, 1974; Timoshenko 등, 1961)이 어떻게 발생되는지 고찰해 보고자 하였다. 비록 앞서 언급하였듯 유한요소해석 결과 이 실험에서 설정된 최대하중 하에서는 좌굴이 발생하지 않을 것으로 예상되었지만, 이는 초기 결함이 없이 재료적 및 기하적으로 완벽한 경우를 가정한 결과이므로 제작 오차 등으로 말미암아 좌굴이 발생할 가능성을 배제할 수 없을 것으로 예상되었다.

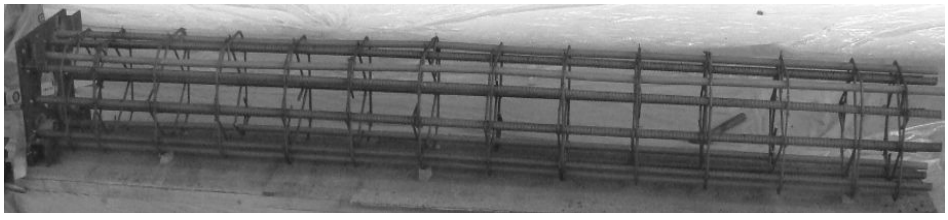
Fig. 5와 같이 단면이 400mm×400mm이고 길이가 4m인 CS400 부재 10개와 단면이 400mm×400mm이고 길이가 2m인 TC400 부재 8개를 제작하여 총 길이 28m가 되도록 부재들을 조립하여 실험하였다.

4.2 시험체 제작

실험에 필요한 부재인 CS400과 TC400 부재는 D22 주철근과 D10 띠철근을 배근하여 Fig. 10 및 11과 같이 제작하였다. 단면의

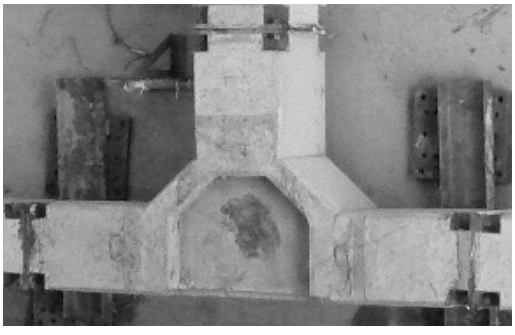


(a) Shape

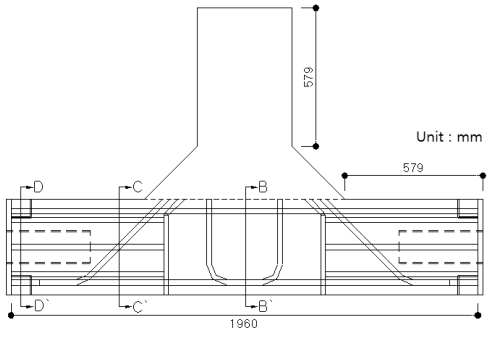


(b) Reinforcement details

Fig. 10. Shape and reinforcement details of a CS400 component member



(a) Shape



(b) Reinforcement details

Fig. 11. Shape and reinforcement details of a TC400 component member

가운데에는 부재의 중량을 감소시키기 위한 중공을 만들기 위하여 지름 140mm의 PVC관을 삽입하였고, 부재의 단부에는 부재 간의 볼트 연결을 위하여 두께 20mm의 강판을 부착하였다. 부재의 제작 시 단부 강판이 부재축에 직각을 이루고 또한 볼트 구멍 위치가 정확히 일치되어야 하중 전달 및 조립에 문제가 발생하지 않으므로 이러한 점에 주의하였다. 그 결과 부재 조립 및 재하 시험 시 큰 문제는 없었으나, 뒤에서 상세히 분석하듯 강판의 제작 및 설치 시 발생하는 미소한 오차로 인해 강판끼리 완벽하게 맞닿지 않는 부분이 일부 존재하여 실험결과에 영향을 주는 것으로 나타났다.

4.3 실험 방법

4.3.1 시험체 조립

CS400과 TC400 부재들을 조립하여 길이 28m, 전체 폭 2.4m의 PCT 시스템을 구성하였으며, 반력보는 총 2개를 제작하여 시험체 양쪽에 배치하고 재하 도중 반력보가 벌어지지 않도록 지름이 80mm인 강봉을 좌우측 각각 4세트씩 총 8세트를 연결하여 Fig. 12와 같이 설치하였다.

4.3.2 가력 방법

Fig. 13과 같이 시스템의 한쪽 단부에 최대 용량이 2,000kN인 실린더와 로드셀을 2개소에 설치하여 하중을 가력하고 하중값을 측정하였다. 하중 가력은 50kN/min의 속도로 양쪽에 각각 1,900kN까지 증가시키면서 50kN 단위로 계측을 실시하였다.

4.3.3 계 측

횡방향 변위를 측정하기 위해 총 10개의 CS 부재의 중앙에 LVDT를 설치하였고, 하중가력으로 인한 종방향 변위를 측정하기 위해 가력점에서 4.8m 떨어진 지점에 LVDT 2개를 추가적으로 설치하였다.

한편 사전 해석결과에 의할 때 시험체의 응력 및 변형률 분포는 부재축을 따라 큰 변동이 없을 것으로 예상되었으므로, 대표적인 CS 부재 및 TC 부재들을 선정하여 변형률을 측정하였다. CS 부재의 압축변형률을 측정하기 위해 선정된 2개의 CS 부재들에 배근된 8개의 철근 가운데 각 모서리의 4개 철근에 변형률계를 설치하였다. 그리고 선정된 2개의 TC 부재들의 철근에도 종, 횡방향

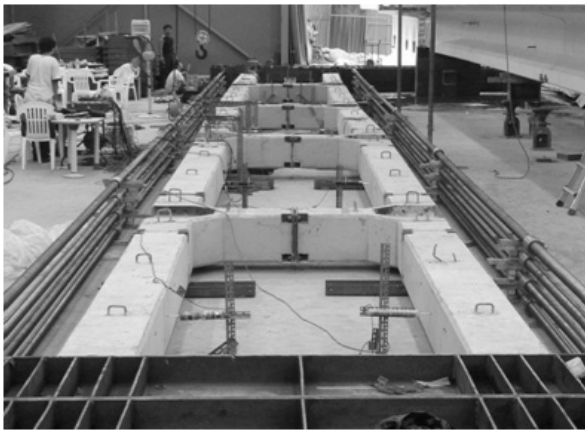


Fig. 12. Complete view of the test specimen

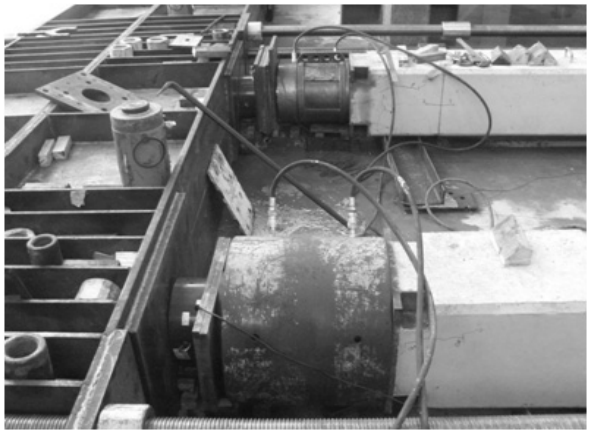


Fig. 13. Loading cylinder and load cell

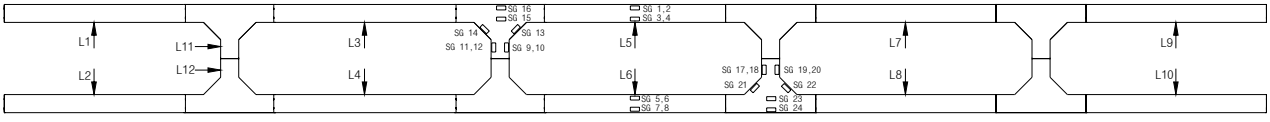


Fig. 14. Location of LVDTs (L) and strain gages (SG)

및 경사 방향으로 변형률계를 설치하였다. Fig. 14는 시험체에서 LVDT 및 변형률계가 설치된 위치를 보여주고 있다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 변 위

5.1.1 종방향 변위

Fig. 15는 Fig. 14의 L11 및 L12 위치에서 측정한 값을 평균한 종방향 변위 그래프이다. 여기에서 이론값은 유한요소해석을 통해 구한 값이지만 선형탄성이론을 적용하였으므로 $\delta = PL/E_cA_g$ 식으로 구한 값과 거의 동일하였다. 여기에서, δ는 종방향 변위, P는 재하하중의 합계, L은 부재의 축방향 길이를 의미하고, E_c 및 A_g의 의미는 Table 2와 같다. 2개의 재하 위치 중 1개소만을 기준하였을 때 최대 재하하중 1,900kN에 대한 최대 변위는 유한요소해석 시 13.9mm, 수식에 의한 수계산시 13.1mm가 산출되었다.

한편 최대 재하하중에서의 실험값은 24mm로 이론값보다 약 73% 크게 측정되었으며, 이것은 주로 부재 연결부 강판의 제작 또는 설치 시의 오차로 인하여 부재 연결부 사이에 존재하는 미소한 간극이 가력 과정에서 줄어들면서 실제 시험체의 변위에 추가되는 과정에서 발생한 것으로 판단된다.

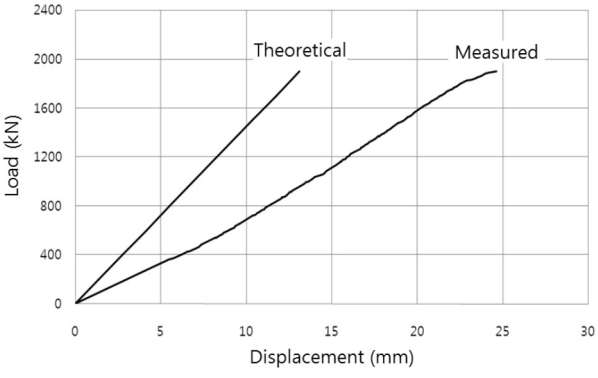


Fig. 15. Longitudinal displacements near the loading points

5.1.2 횡방향 변위

Fig. 16은 부재 중간 L5 및 L6 지점의 횡방향 변위 그래프로서 L6은 0.5mm, L5는 9mm의 최대 변위를 나타내었다. 이는 역시

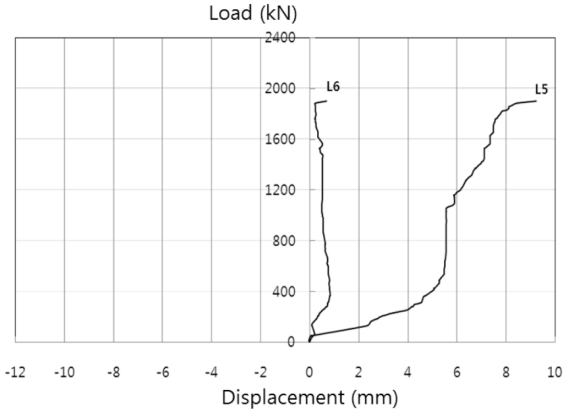


Fig. 16. Transverse displacements in the middle of the test specimen

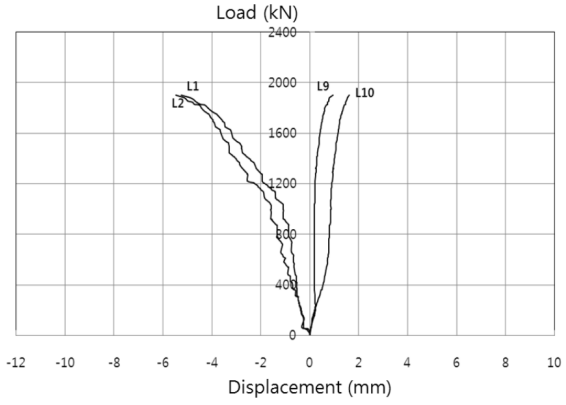


Fig. 17. Transverse displacements at both ends

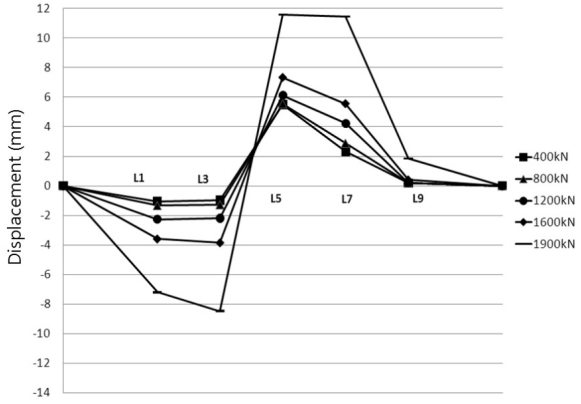


Fig. 19. Transverse displacements of CS_L component members

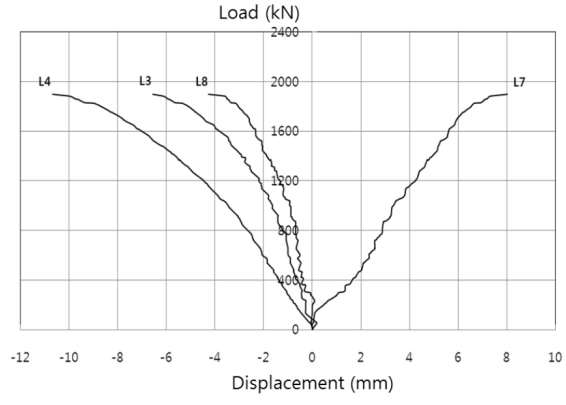


Fig. 18. Transverse displacements at quarter points

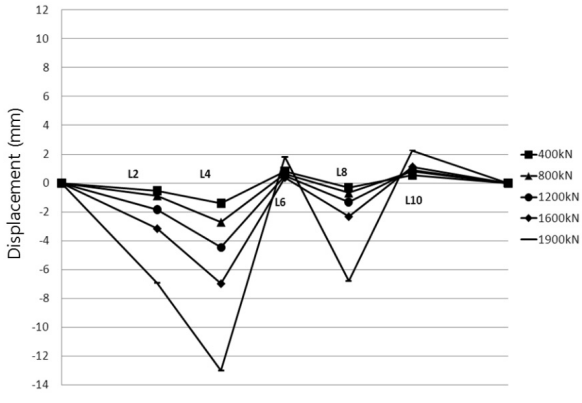


Fig. 20. Transverse displacements of CS_R component members

제작 오차로 인한 연결부 사이의 간극의 위치별 차이로 인해 가력 과정에서 부재 변형 시 대칭성이 유지되지 못하면서 발생한 결과로 생각된다. Fig. 17은 L1, L2, L9 및 L10의 횡방향 변위 그래프로서, 가력부로부터 2m 지점인 L1과 L2는 −5mm의 최대 변위를 보였고, 지점부로부터 2m 지점인 L9와 L10은 1mm의 최대 변위를 보였다. 여기에서 −부호는 LVDT의 설치 위치상 CS_L 부재와 CS_R 부재 사이의 간격이 좁아지는 것을 의미하고, +부호는 반대로 간격이 벌어지는 것을 의미한다. Fig. 18은 L3, L4, L7 및 L8의 횡방향 변위 그래프로서 L7과 L8이 서로 대칭이 아닌 방향으로 거동하는 것이 특이하며 이는 역시 주로 연결부 제작 오차에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 19와 20은 각각의 위치에서 계측된 CS_L과 CS_R 부재들의 횡방향 변위를 하중단계별로 정리한 그래프이다. 시험체가 기하적으로 완벽하고 재료의 물성도 전체적으로 균등하다고 가정할 때 이론적으로는 포아송비의 효과에 의해 −부호를 가진 매우 미소한 크기의 횡변위가 발생하고, 계측 위치별 횡변위의 차이는 발생하지 않는다. 이는 부재가 축방향으로 일정한 크기의 압축을 받을 때 부재 횡방향으로는 일정한 크기의 인장변형률 및 이에 대응되는 변위가 발생하기 때문이다. 그러나, 이상의 그림에서 보듯이 실제로는 콘크리트 강도의 불균일성, 부재 단면이나 강판 등의 제작 오차로 인하여 다소 불규칙한 경향의 횡변위가 수반되었다. 실제 발생한 횡변위는 미소한 수준이므로 오일러 좌굴이론에 의한 좌굴 거동이라기 보다는, 재하 시 시험체의 변형 과정에서 부재들이 축방향으로 일직선을 이루지 못하는 기하적 불완전성 등에 기인한 휨 거동 때문으로 보는 것이 타당하다 판단된다(Chajes, 1974; Timoshenko 등, 1961).

이러한 미소한 횡변위는 PCT 시스템의 현장 적용 시 실용적으로 문제가 없는 수준으로 판단된다. 이처럼 횡변위가 최소화 될 수 있었던 것은 실험 대상 PCT 시스템의 TC 부재들이 CS_L 및 CS_R 부재들의 연결보 역할을 효과적으로 수행하고 있기 때문으로 사료된다. 결과적으로 Fig. 5와 같은 PCT 부재들의 결합은 Fig. 2(b)의 PCT 시스템에서 토압에 의한 큰 압축력을 지지해야 하는 트러스 버팀보의 역할을 효과적으로 수행할 수 있는 것으로 파악된다.

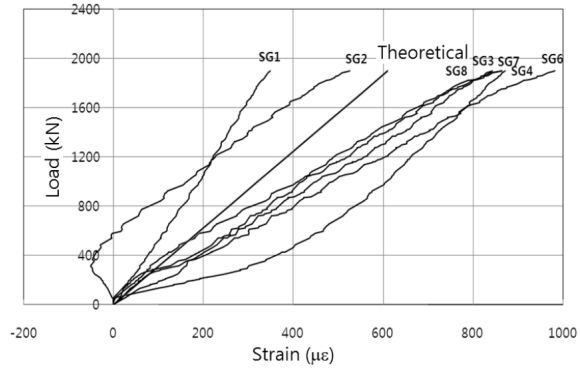


Fig. 21. Longitudinal strains of CS component members

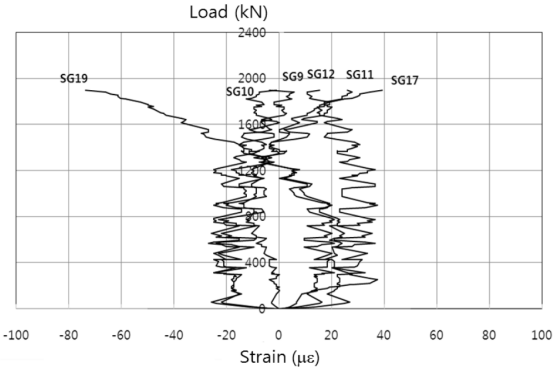


Fig. 23. Transverse strains of TC component members

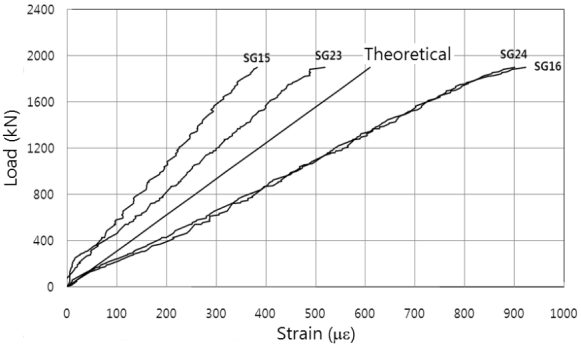


Fig. 22. Longitudinal strains of TC component members

5.2 변형률

5.2.1 종방향 변형률

Fig. 21은 CS 부재의 종방향 변형률 그래프이다. SG2의 일부 구간을 제외한 나머지 값들은 모두 압축변형률을 보였으나 동일한 값을 나타내지는 않았다. SG1 및 SG2를 제외하면 실험값은 유한요소해석으로 구한 이론값에 비해 대체적으로 더 큰 값을 나타내었다. Fig. 22는 TC 부재의 종방향 변형률 그래프이다. TC_L 부재에서는 SG16이 SG15에 비해 큰 값을 보였고, TC_R 부재에서는 SG24가 SG23에 비해 큰 값을 보였다. 즉, 상대적으로 바깥쪽에 설치된 SG값이 안쪽에 설치된 SG값보다 크게 측정되었다. TC 부재의 경우에는 이론값이 실험값의 평균에 위치하였다.

이상의 결과에서 판단해 볼 때 모든 부재들이 이론과 같이 축방향으로 고르게 압축되었다기 보다는 위치별로 다소의 차이가 있었고 주된 압축거동에 부가하여 미소한 휨 거동도 발생한 것으로 파악된다. 휨 거동의 경우 5.1.2절의 횡방향 변위 측정결과 분석에서도 유추되었던 사항이다. 이는 부재 및 연결부 제작 시 수반되는 불완전성을 고려하면 예상될 수 있는 결과이지만, 실험에서 측정된 종방향 변형률들의 평균값은 대략적으로 이론값과 유사한 경향을 보인다고 생각된다.

5.2.2 횡방향 변형률

Fig. 23은 TC 부재의 횡방향 변형률을 나타낸 그래프이다. SG17 및 SG19를 제외한 나머지 변형률계에서 0에 가까운 값이 나타났으며, SG17 및 SG19의 값도 종방향 변형률에 비하면 미소한 수준이었다. 이는 본 실험의 주된 거동이 PCT 시스템 시험체의 축방향으로 발생하는 관계로 당연한 결과이다.

5.3 파괴 거동

시험체의 파괴는 Fig. 24와 같이 TC 부재에서 긴장재의 긴장을 위한 공간 확보를 위해 단면 형상이 작아지는 부분에서 일어났다. 본 실험의 PCT 시스템 부재들은 주로 압축 거동하에 있으므로 긴장재를 삽입하여 프리스트레스를 가하지는 않았지만, PCT 시스템의 현장 적용 시에는 상황에 따라 이러한 작업이 필요할 수도 있으므로 이를 염두한 일반적인 TC 부재의 형상으로 제작한 결과이다. TC 부재는 긴장재의 긴장을 위해 강판으로 보강하였지만 콘크리트 단면적이 감소되고 콘크리트와 강판의 부착이 완벽하게 이루어지지 않아 콘크리트 단면에 발생하는 압축응력이 과도하게 되어 파괴가 발생한 것으로 판단된다. Fig. 24를 보면 TC 부재의 파괴 시 콘크리트 상부에 부착한 강판 및 내부의 철근들에 좌굴이 발생하면서 피복 콘크리트가 떨어져 나가는 현상이 동반되었음을 알 수 있다. Table 1과 같이 Fig. 11의 D-D' 단면에서 계산된 설계 축하중은 1,748kN으로, 실험 시에는 이보다 8.7%가 큰 최대 재하하중인 1,900kN에 도달했을 때 D-D' 단면 부근에서 국부파괴가 발생하였다. 물론 식 (1)에서 설계 축하중 산정 시 고려한 각종 감소계수를 제외하면 D-D' 단면의 설계 축하중도 1,900kN을 초과하므로 이 단면에서 파괴가 발생하지는 않을 것으로 예상되지만 상기의 이유로 파괴가 발생하였다고 생각된다.

또한 Fig. 25와 같이 부재 단부, 즉 재하부에서 다소 많은 균열이 발생하였는데, 주로 볼트를 조립할 수 있도록 단부에 설치한 앵글들의 모서리 부근에서 응력이 집중되어 균열이 처음 발생한 후 균열이

Fig. 24. Failure mode of the TC component member

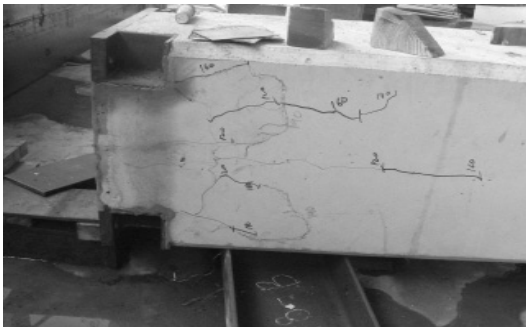


Fig. 25. Cracking behavior near the loading point

진전되었다. 그러나, 실제 현장에서 Fig. 2(b)와 같이 트러스 버팀보를 구성할 경우 단부에서의 하중 집중 현상이 어느정도 해소되므로 단부 균열 문제는 완화될 것으로 생각된다.

이처럼 전체적으로 PCT 시험체의 일반 부위는 충분한 내력을 보유하고 있었으나, TC 부재의 단면이 축소되는 부분에 다소의 취약성이 있는 것으로 나타났으므로 추후 설계 시 이 부분을 추가적으로 보강하는 조치가 필요할 것으로 사료된다. 예를 들어 Fig. 24에서 좌굴이 발생한 강판과 콘크리트 간의 부착을 강화할 수 있는 조치 등이 도움이 될 것으로 생각된다. 이러한 점만 보완된다면 PCT 시스템은 큰 토압을 지지하는 가설구조물로서 더욱 큰 내력을 발휘할 수 있을 것으로 생각된다.

이 실험의 최대 재하하중인 1,900kN은 토압의 영향을 환산한 것으로 볼 수도 있으며, 만약 본 시험체와 같은 형태의 PCT 시스템이 해당 토압에 대해 충분한 안전도를 보유하고 있지 못하다고 판단된다면, PCT 시스템의 장점 중 하나인 다양한 부재 구성 능력을 활용하여 부재 구성을 개선하는 것도 바람직하다. 예를 들어 Fig. 4(c)와 같이 트러스 버팀보의 형태를 바꾼다면 산술적으로 본 시험체에서 2열의 CS 부재들이 받던 압축력을 3열의 CS 부재들에 분산시킬 수 있으므로 각 열의 CS 부재들에 작용하는 하중이 1,900kN에서 1,267kN으로 감소될 수 있다.

6. 결 론

기존의 강재를 이용한 흙막이 가시설을 개량할 목적으로 PCT (Precast Concrete Truss) 시스템을 제안하였으며, 그 성능 및 내하력을 검증하고 개선점을 도출하기 위해 실제 규모의 시험체를 제작하여 가력실험을 실시하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 주요 프리캐스트 트러스 부재와 연결부의 형태를 표준화함으로써 다양한 형태의 트러스 가설구조물을 구성함과 동시에 프리캐스트 콘크리트의 장점인 급속 시공 및 재활용성을 극대화할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) PCT 시스템 중 큰 압축력을 지지해야 하는 버팀보 부분을 모사한 본 시험체에서 변위 및 변형률 등의 실험결과를 분석해 보면 부재 축방향 거동이 주를 이루지만 미소한 휨 거동도 발생하였다. 그러나, 트러스 주부재들 간을 연결하는 연결보에 의해 이러한 부수적인 거동은 최소화 될 수 있었다. 또한 이처럼 횡지지 역할을 하는 연결보들이 버팀보 설계 시 가장 중요한 좌굴 방지 기능을 효과적으로 수행하고 있음을 실험 및 해석으로 확인할 수 있었다. 따라서 도출된 버팀보 시스템은 현장에 적용되어 소정의 토압을 효과적으로 지지할 수 있을 것으로 생각된다.

(3) PCT 시험체의 실험 시 측정한 축방향 변위가 유한요소해석 또는 수계산에 의한 이론값보다 다소 크게 나타나고 있으며, 이는 부재 간의 연결부에 설치된 강판 면 사이의 간극 등에 기인한 것으로 생각된다. 이러한 부재 제작 시의 오차를 줄임으로써 PCT 시스템 설계 시 해석을 통한 거동 예측의 신뢰도가 향상될 수 있을 것으로 생각된다.

(4) 실험된 PCT 시스템의 일반적인 부위는 극한하중 도달 시까지 건전성을 유지하였으며, PCT 시스템의 파괴는 주로 추가적인 긴장재의 긴장을 위한 공간 등 단면이 축소되는 부분에서 발생하였다. 따라서 PCT 시스템 자체의 내하력을 더욱 향상시키기 위해서는 불가피한 단면 축소 부분을 적절히 보강하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

(5) 이 연구에서 개발된 PCT 시스템은 주로 흙막이 가설구조물을 염두한 것이지만 프리캐스트 콘크리트 트러스는 이 외에도 교량 등 그 적용 범위가 다양할 것으로 기대된다. 특히 기존 강재 구조물을 대체할 경우 경제성 등에서 유리할 것으로 생각된다.

References

Chajes, A. (1974) *Principles of structural stability theory*, Prentice-Hall.

Cho, J.-Y., Lee, Y.-H., Kim, D.-H., and Park, J.-H. (2011). "Development of precast hollow concrete columns with non-shrink mortar grouting type splice sleeve." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 3A, pp. 215-225 (in Korean).

Chung, C.-H. and Hyun, B.-H. (2007). "Continuity of PSC composite bridge with precast decks." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 4A, pp. 561-568 (in Korean).

Han, M.-Y., Jin, K.-S., and Kang, S.-H. (2009) *Research report on development of construction method of prefabricated precast concrete temporary structures*, Civil Engineering Technology Research Center, Ajou University (in Korean).

Han, M.-Y., Jin, K.-S., and Kang, S.-H., and Kim, S.-B. (2007). "Comparison and investigation of field test and structural analysis for innovative prestressed support(IPS) system." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 1C, pp. 11-20 (in Korean).

Han, M.-Y., Kim, J.-H., Kang, S.-H., Jin, K.-S., Jeon, Y.-S., and Cho, B.-K. (2008). "An experimental study on compressive loading capacity of PCT system." *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 20, No. 2, pp. 41-44 (in Korean).

Han, S.-H., Hong, K.-N., and Lee, J.-B. (2009). "An experimental study on uniaxial compressive behavior of RC circular columns laterally confined with prestressing aramid fiber strap." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 2, pp. 159-168 (in Korean).

Hong, K.-N., Han, S.-H., Yoon, S.-J., and Seo, S.-Y. (2006) "Uniaxial compressive test and confined model on RC columns using high-strength materials." *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 5, KCI, pp. 65-72 (in Korean).

Kim, S.-B., Han, M.-Y., Kim, M.-Y., and Jung, K.-H. (2006). "Design of building excavation plane in Innovative Prestressed Scaffolding (IPS) system." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 1A, pp. 163-171 (in Korean).

Korea Concrete Institute (2012). *Structural concrete design code* (in Korean).

Korea Expressway Corporation (2005). *Detailed design code of temporary earth retaining structures* (in Korean).

Lee, C.-H., Chin, W.-J., Choi, E.-S., and Kim, Y.-J. (2011). "An experimental study on the joints in ultra high performance precast concrete segmental bridges." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, pp. 235-244 (in Korean).

MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2012). *http://www.midasit.com.*

Park, J.-Y., Yang, W.-J., Yi, W.-H., and Oh, S.-H. (2008). "An experimental study on the axial strength of centrifugally formed shell PC columns." *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, *KCI*, Vol. 20, No. 2, pp. 37-40 (in Korean).

Shin, H.-M. and Lee, J.-H. (2013). *Reinforced concrete*, 11th ed., Dongmyungsa (in Korean).

Timoshenko, S. P. and Gere, J. M. (1961) *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill.

Won, D.-H., Lee, D.-J., Kim, S.-J., and Kang, Y.-J. (2011). "A study on behavior characteristics of precast coping part under axial load." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 3, pp. 281-287 (in Korean).