

혁신적 프리스트레스트 가시설 구조시스템(IPS)에 적용되는 중간 버팀보의 해석 및 설계

Anlysis and Design of Support Strut in Innovative Prestressed Scaffolding(IPS) System

김 성 보¹⁾ · 한 만 엽²⁾ · 김 문 영³⁾ · 김 낙 경⁴⁾ · 한 진 희⁵⁾
Kim, Sung Bo Han, Man Yop Kim, Moon Young Kim, Nak Kyung Han, Jin Hee

요 약 : 본 논문에서는 프리스트레스트를 이용한 가시설 공법(IPS)에 적용되는 중간 버팀보의 거동 해석 및 설계 절차에 대한 연구를 수행하였다. IPS 중간 버팀보는 조립 단면을 갖는 기둥과 같은 구조 부재이므로 이에 대한 안전성 검토가 필요하다. 중간 버팀보에 작용하는 하중은 기존 가시설에 재하되는 토압을 적용하여 IPS 중간 버팀보의 설계를 실시하였고 면내·외 좌굴거동 해석을 위한 전산해석모델을 작성하였다. IPS 중간 버팀보의 좌굴에 대한 고유치를 구한 값과 정적 해석을 통해 계산된 부재력을 이용하여 유효 좌굴장을 계산하였다. 허용 축방향 압축응력과 허용 휨압축응력을 도출해 합성응력 검토를 수행하여 IPS 중간 버팀보의 안전성을 검토하였다.

ABSTRACT : The analysis and design procedure of intermediate support strut for the innovative prestressed scaffolding (IPS) system was presented in this paper. The stability check of intermediate support strut is required as the behavior of the strut system is similar to that of the built-up column. The computer analysis model of the support strut was constructed for in-plane and out-of-plane buckling analysis, and the design of the support strut was performed. Using the eigenvalue for the buckling load and the member forces of support strut under design earth pressure, the effective buckling length was estimated. The allowable axial and bending stresses were calculated considering the effective buckling length. The combined stresses due to these axial forces and bending moment were estimated to be satisfied the safety condition of the intermediate support strut.

핵심용어 : IPS, 프리스트레스트, 중간 버팀보, 조립단면, 합성응력

KEYWORDS : IPS, Prestress, Support support, Built-up column, Combined stresses

1. 서론

토류 가시설은 지하를 굴착한 뒤 지반이 붕괴되는 것을 막기 위하여 굴착된 지하 공간에 설치되는 임시구조물로서, 토목 현장에는 지하철 건설 등에 많이 사용되고 있으며, 건축 현장의 경우에서도 지하공간의 활용이 중요해짐에 따라 그 사용이 확대되고 있다.(김낙경, 1998; 김재관 등, 1996; 최인걸 등, 1999) 기존의 대부분의 가시설 공법은 주로 H-형강의 휨 저항력과 압축저항력을 이용하여 토압을 지지하는 구조이다.

그러나, H-형강의 휨 저항력과 압축 저항력은 한계가 있어서 토압을 지지하기 위해서는 많은 수의 H-형강을 사용하여 촘촘히 설치해야 하기 때문에 작업공간이 좁아져 시공에 많은 어려움이 발생한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 H-형강에 강선을 배치하고 프리스트레스트를 도입하여 H-형강의 휨 저항력을 대폭 증가시켜 떠장의 받침 길이, 즉 버팀보의 간격을 기존보다 수 배에서 십 여배까지 증가시킨 혁신적인 프리스트레스트 가시설공법(IPS System, Innovative Prestressed support System)이 개발되었다.(한만엽 등, 2003; 김성보 등,

1) 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수
(Tel : 043-261-3241, Fax: 043-275-2377, E-mail: sbkim@chungbuk.ac.kr)
2) 정회원, 아주대학교 토목설계공학과 교수(myhan@ajou.ac.kr)
3) 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수(kmye@skku.ac.kr)
4) 성균관대학교 토목환경공학과 교수(nkkim@skku.ac.kr)
5) 충북대학교 토목공학과 석사과정(zini2171@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

2005; 박종식 등, 2003)

IPS 공법은, 작업공간을 대폭 확대시킴과 더불어, 기존의 여러 개의 버팀보를 한 곳에 모아 토압을 받치는 구조가 되기 때문에 버팀보의 강제 물량을 줄일 수 있는 공법이다. 즉, 수직과 수평으로 설치된 주로 힘을 받는 부재에 효과적인 프리스트레스를 도입하여, 기존의 버팀보의 설치 간격을 대폭 늘리고 효율적인 구조의 버팀보를 사용하여 버팀보의 설치수를 대폭 줄임으로써 굴착된 지하 공간을 대폭적으로 넓혀 줄 수 있게 되어, 지하 공간에서의 작업 여건을 월등히 개선하고, 공사비 또한 대폭적인 절감이 가능하다.

본 논문에서는 IPS 중간 버팀보의 좌굴 해석과 정적 해석을 통해 버팀보의 안전성 해석과 설계기법을 정립하고자 한다. IPS 중간 버팀보의 조립 기동에 대한 안전성을 검토하고, 좌굴 해석을 통한 고유값과 정적 해석을 통한 축력 및 모멘트 값으로 허용 응력을 산출한다. 계산된 허용 응력값과 축력, 모멘트력으로 구조물의 합성응력 설계식을 만족시키는지 평가한다.

2. IPS 공법의 기본 이론

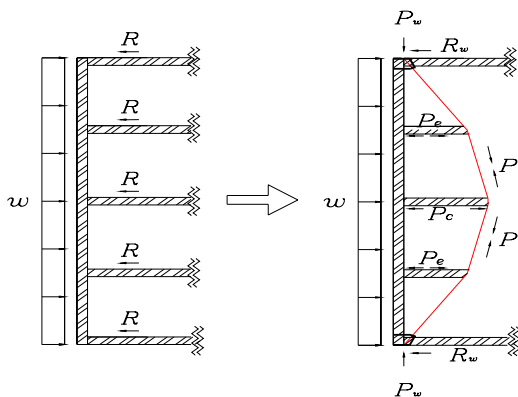


그림 1. Principles of IPS

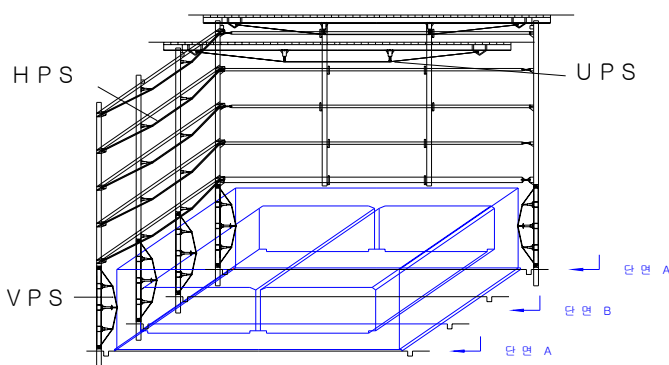


그림 2. General concept of IPS

기존의 토류 가시설은 H-형강 띠장의 휨 저항력을 이용하여 토압에 저항하는 개념으로 설계가 되고 있지만, IPS 공법

은 H-형강 띠장에 프리스트레싱을 도입하여, 띠장의 휨 저항력을 대폭 증대시킴으로써 기존의 가시설 공법에서 공사에 막대한 지장을 초래하였던 버팀보의 설치간격을 대폭 늘릴 수 있도록 하였다. IPS 공법의 기본 원리는 그림1 과 그림 2 에 도시되어 있다. 기존 공법에서는 토압을 지지해 주기 위하여 그림 1에 제시된 바와 같이 5개의 버팀보를 배치하여, 버팀보의 축력으로 토압을 지지한다.

그러나, IPS 공법에서는 받침대와 강선에 장력을 발생시키면, 재래식 공법에서의 중간 버팀보와 같은 위치에 같은 크기의 지지력을 발휘할 수 있게 된다. 이는 이미 시공된 가시설 현장에서도 받침대의 높이와 장력 및 강선량만 조절해 준다면, 지지조건의 변화가 없기 때문에 지반에 대한 해석을 다시 할 필요가 없다는 의미가 되며, 계산치보다 큰 장력을 가하여 선행하중을 주면 지반 침하를 방지할 수 있어서 도심지 공사에 특히 유리하다. 또한, 기존 공법에서는 버팀보가 단독적으로 사용되어 좌굴에 대한 내하력이 작아 비효율적이며 많은 브레이싱이 설치되어야 한다. 그러나, IPS 공법에서의 기존의 수 개의 버팀보를 한곳에 모아 설치하는 구조이므로 좌굴에 효과적인 구조를 사용하여 경제적인 버팀보 시스템을 구성할 수 있다. 그림 2는 수직파일과 수평보 및 주형보에 모두 프리스트레싱을 도입하여 굴착 및 지보공이 설치된 상태를 나타내는 사시도이다.

이 그림에서 IPS 공법의 주요 구성요소인 HPS (Horizontal Prestressed Scaffolding), VPS (Vertical Prestressed Scaffolding), UPS(Upper Prestressed Scaffolding)의 사용방법을 볼 수 있다. 또한, 기존 공법에서는 주형보의 수직하중을 받아주기 위한 중간파일이 필요하였으나, 본 공법에서는 주형보에도 프리스트레싱을 해줌으로써 중간파일을 제거하였다. 중간파일이 없어진 주형보들은 서로 횡방향으로 브레이싱을 하여 상부 가시설의 지지 구조를 견고하게 만들 수 있다. 따라서, 기존의 공법에서는 주형보의 하중을 받아주었던 중간파일은 더 이상 수직하중을 받지 않으므로 버팀보의 좌굴을 방지하는 브레이싱 역할만 하도록 함으로써 본 구조물에 수직 구멍이 발생하는 것을 막을 수 있다.

3. IPS 중간 버팀보의 안전성 해석

3.1 IPS 중간 버팀보의 필요성 및 거동

IPS 중간 버팀보는 그림 3과 같이 구조물 굴착면이 정사각형이 아닌 한변이 상대적으로 긴 공사에 많이 사용된다. 띠장의 중앙부에 작용하는 토압을 케이블의 장력만으로는 지지할 수 없으므로, 장변을 두구역으로 분할하여 토압에 대한 지지

대 역할을 해주는 것이다.

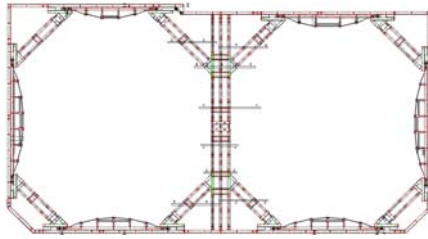


그림 3. IPS system

즉, 그림 3과 같이 상·하변의 길이가 좌·우변의 길이에 비해 2배 정도 긴 굴착평면에서 네변을 단일 IPS 띠장으로 시공하면 장변과 단변의 토압 불균형 및 장변 IPS 띠장에 과도한 토압이 작용하게 된다. 따라서, 장변을 분할하여 두 개의 IPS 띠장을 설치하고 중간에 중간 버팀보를 설치하여 토압을 효과적으로 지지하는 시스템을 만들게 된다.

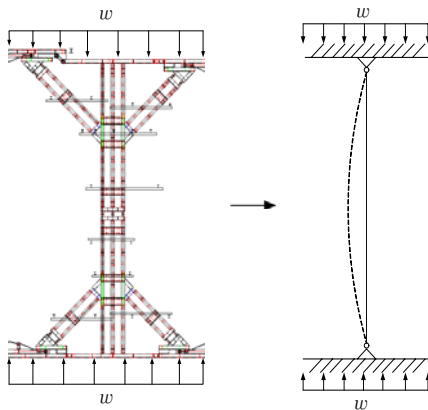


그림 4. IPS support strut system

그림 4와 같이 토압(w)을 받고 있는 IPS 중간 버팀보는 상부와 하부로부터 동시에 토압을 받게 되는데 이럴 경우 IPS 중간 버팀보는 기둥과 같은 거동을 하게되며, 기둥의 경우와 같이 좌굴문제가 대두된다.

부재의 단면이 단일 형강으로 구성되어 있는 경우의 좌굴 거동은 엄밀히 표현되지만 그림 4와 같이 여러 부재가 조립된 경우의 좌굴 거동은 단일기둥에 비하여 복잡하고 여러 요소가 복합적으로 작용한다. 본 논문에서는 이러한 영향을 고려한 중간 버팀보의 설계 및 해석 기법을 수립한다.

3.2 조립기둥으로 치환한 중간 버팀보의 허용압축응력

조립 기둥은 주부재와 주부재를 견고히 조립해주는 레이싱 바(lacing bar) 또는 띠판(tie plate) 등으로 연결되어 하나

의 기둥으로 작용하므로 단일 부재의 기둥으로 치환하여 등가 세장비를 계산하는 과정이 필요하다.

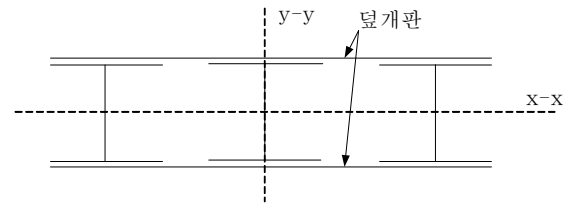


그림 5. Cross section of built-up column with 3-strut

그림 5와 같이 3개의 H-형강이 덮개판으로 연결되어 하나의 형강으로 거동하는 조립 기둥이 있다. 조립 기둥의 유효 세장비(λ_e)는 덮개판 사이 단일 부재의 약축에 대한 세장비(λ_{1y})와 조립 기둥의 면외 좌굴에 대한 세장비(λ_{ex})나 면내 좌굴에 대한 세장비(λ_{ey}) 값으로부터 식 (1)과 같이 산정된다.(장승필 등, 1999) m 값은 주부재의 개수를 나타내며, $\text{MAX}(\lambda_{ex}, \lambda_{ey})$ 는 λ_{ex} 와 λ_{ey} 중 큰값을 의미한다.

$$\lambda_e = \sqrt{[\text{MAX}(\lambda_{ex}, \lambda_{ey})]^2 + \frac{m}{2} \lambda_{1y}^2} \quad (1)$$

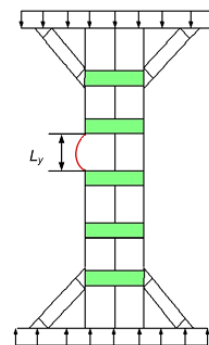


그림 6. Covering plate between the single strut buckling length

조립부재에서 덮개판은 각각의 단일부재를 연결해줌으로서 부재의 약축(y축)에 대한 좌굴 발생을 막아준다. 이때, 각각의 부재는 덮개판에 의해 약축(y축)이 구속되므로 단일부재의 좌굴장 L_y 는 그림 6과 같으며 단일부재의 세장비는 식(2)로 구한다. 여기서, r_{1y} 는 단일형강의 약축에 대한 회전반경이다.

$$\lambda_{1y} = \frac{L_y}{r_{1y}} \quad (2)$$

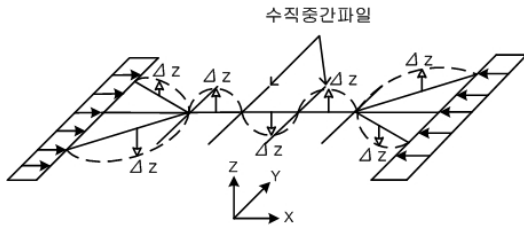


그림 7. Out-plane buckling mode

그림 7과 같은 면외 좌굴에 대한 세장비 (λ_{ex})는 면외 좌굴의 유효 좌굴 길이 (L_e)를 면외 좌굴에 대한 회전 반경으로 나누어 구한다. 중간 버팀보에 수직 중간 파일이 있을 경우는 유효 좌굴 길이 (L_e)는 수직 중간 파일 사이의 거리이다.

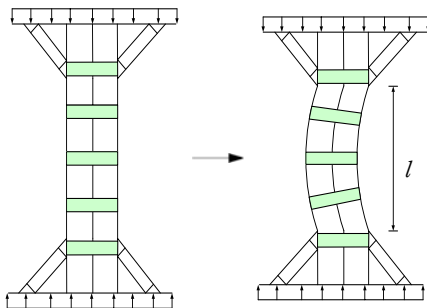


그림 8. In-plane buckling mode

면내 좌굴에 대한 세장비 (λ_{ey})는 그림 8과 같이 덮개판에 의해서 수평으로의 변위를 구속해 조립 기둥이 하나의 부재처럼 거동하므로 유효 좌굴 길이 (L_e)는 그림 8의 l 과 같다. 조립 기둥의 면내 좌굴 방향에 대한 회전 반경은 주부재의 개수에 따라 식 (3), (4), (5)와 같이 구할 수 있다.

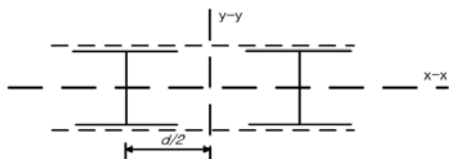


그림 9. Built-up column with 2-Strut

$$r_{ey} = \sqrt{\frac{2A(\frac{d}{2})^2 + 2I_{1y}}{2A}} = \sqrt{\frac{d^2}{4} + r_{1y}^2} \quad (3)$$

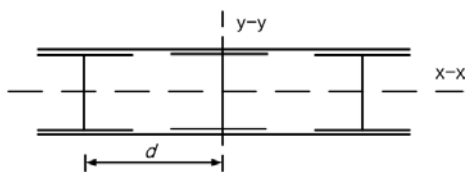


그림 10. Built-up column with 3-Strut

$$r_{ey} = \sqrt{\frac{2Ad^2 + 3I_{1y}}{3A}} = \sqrt{\frac{2}{3}d^2 + r_{1y}^2} \quad (4)$$

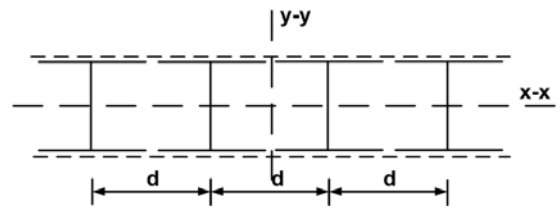


그림 11. Built-up column with 4-Strut

$$r_{ey} = \sqrt{\frac{5}{4}d^2 + r_{1y}^2} \quad (5)$$

세장비가 클수록 좌굴에 대한 대한 위험성이 높아지므로, 면외 좌굴에 대한 세장비 (λ_{ex})와 면내 좌굴에 대한 세장비 (λ_{ey})를 비교하여 이 중 큰 세장비를 이용하여 조립 단면의 유효 세장비를 식(1)에 대입하여 계산한다.

조립 단면의 유효 세장비가 정해지면, 허용 압축 응력 (f_{ca})을 산출하여 안전성을 검토한다.

3.3 전산해석에 의한 중간버팀보의 좌굴거동

구조물의 합성 응력 설계 조건은 다음과 같다.

$$\frac{f_c}{f_{ca}} + \frac{f_b}{f_{ba}(1 - f_c/f_e)} = K \leq 1 \quad (6)$$

식 (6)에 의하면, 축 응력비와 휨 응력비를 더한 K값이 1 보다 작을때 구조물의 안전성이 확보된다.

축 방향 압축 응력과 휨 압축 응력 계산에 필요한 축력과 모멘트는 구조물을 정적 해석하여 산출하며, 허용 축 방향 압축 응력 (f_{ca})을 구하는데 필요한 유효 좌굴 길이 (L_e)는 좌굴해석을 통하여 다음과 같이 구한다.

구조 해석 프로그램을 통해 좌굴 해석 결과로 구한 고유값을 이용하면 식 (7)와 같이 좌굴 하중(P_{cr})을 구할 수 있다.

$$P_{cr} = N \cdot \lambda \quad (7)$$

여기서, N은 정적 해석 결과 부재 축력이고, λ 는 좌굴 해석 결과 산출된 고유치이다.

한편 기둥의 좌굴 하중은 다음과 같다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (8)$$

구조해석을 통해 구한 좌굴하중 식(7)은 식 (8)과 같아야 한다는 조건으로부터 식 (9)와 같이 부재별 유효 좌굴 길이 (L_e)를 유도할 수 있다.

$$L_e = \sqrt{\frac{\pi^2 \times E \times I}{N \cdot \lambda}} \quad (9)$$

식 (9)에 의해서 유효 좌굴 길이가 산정되면, 이로부터 허용 축방향 압축 응력 (f_{ca}) 및 허용 휨 응력 (f_{ba})을 산출하고 그에 따른 합성 응력을 계산하여 중간 버팀보의 안전성 검토를 실시한다.

4. IPS 중간 버팀보 설계

4.1 조립기둥으로 치환한 중간 버팀보의 안전성 검토

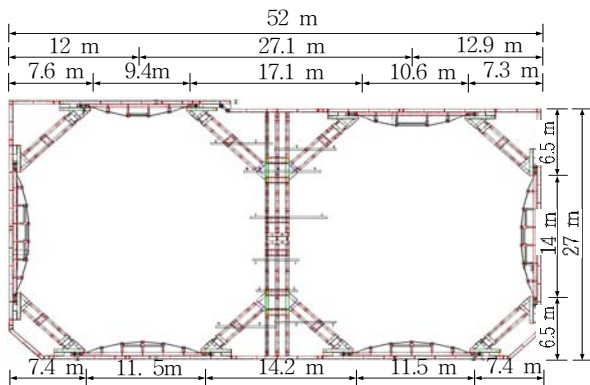


그림 12. IPS system

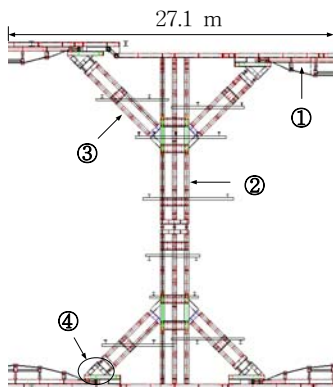


그림 13. Structural model

그림 12는 빌딩의 굴착 평면에 대하여 IPS 시스템을 적용한 사례이고, 그림 13은 전체 IPS 시스템 중 중간 버팀보에 의해 토압이 지탱되는 곳을 나타낸 것이다.

IPS 중간 버팀보의 경우 H-형강 3개가 덮개판으로 연결되어 하나의 부재와 같이 거동하는 것으로 보고 구조물에서의 조립 기둥 안전성을 판정하여야 한다.

IPS 중간 버팀보에 작용하는 토압은 30 tf/m로 토압이 27.1 m의 중간 버팀보에 재하되므로 토압에 의한 총하중은 813 tf이고, 압축 응력은 식(10)과 같다.

$$f_c = \frac{P}{A} = \frac{813000}{174 \times 3} = 1557.47 \text{ kgf/cm}^2 \quad (10)$$

여기서, 중간버팀보로 사용된 H-350×350×12×19단면의 재원은 표 1과 같다.

표 1. Section properties of member (H-350×350×12×19)

A[cm ²]	I _x [cm ⁴]	I _y [cm ⁴]	r _x [cm]	r _y [cm]	S _x [cm ³]	S _y [cm ³]
174	40,300	13,600	15.2	8.84	2300	776

허용 압축 응력은 다음과 같이 구한다.

(1) 덮개판 사이 한개의 H-형강 세장비 (λ_{ly})

한개의 H-형강 부재의 유효 좌굴 길이 (L_e)는 덮개판 사이의 간격 220 cm로 하고, 약축에 대한 회전 반경 (r_{ly})을 사용하면, 세장비 λ_{ly} 는 다음과 같다.

$$\lambda_{ly} = 220 / 8.84 = 24.9 \quad (11)$$

(2) 면외 좌굴 세장비

면외 좌굴은 수직 중간 파일의 간격 510 cm를 유효 좌굴 길이 (L_e)로 보고 세장비를 구하며, 3개의 부재가 조립된 기둥의 면외 좌굴에 대한 회전 반경 (r_{ex})는 식(12)와 같다.

$$r_{ex} = \sqrt{\frac{3I_{1x}}{3A}} = r_{1x} = 15.2 \quad (12)$$

따라서 면외 좌굴에 대한 세장비는 식(13)과 같다.

$$\lambda_{ex} = \frac{L_e}{r_{ex}} = \frac{510}{15.2} = 33.6 \quad (13)$$

(3) 면내 좌굴의 세장비

면내 좌굴의 세장비는 덮개판이 수평으로의 변위를 구속해 H-형강 세 개로 된 조립 기둥이 하나의 단일 부재처럼 거동

하므로 유효 좌굴 길이 (L_e)는 경사 버팀보의 지지 간격 1470 cm를 사용한다.

3개의 H-형강이 조립된 부재의 회전 반경 (r_{ey})은 식(4)로부터 다음과 같이 구한다.

$$r_{ey} = \sqrt{\frac{2}{3}(100)^2 + (8.84)^2} = 82.1 \quad (14)$$

이를 이용한 면내좌굴에 대한 세장비는 아래와 같다.

$$\lambda_{ey} = \frac{1470}{82.1} = 17.9$$

(4) 조립 기둥의 유효 세장비

면외 좌굴에 대한 세장비(33.6)가 면내 좌굴에 대한 세장비(17.9)보다 크므로, 유효 세장비는 식(1)에 의하여 다음과 같다.

$$\lambda_{e,x} = \sqrt{33.6^2 + \frac{3}{2}(24.9)^2} = 45.38 \quad (15)$$

(5) 조립 기둥의 응력검토

조립 기둥의 유효 세장비 45.38을 사용하여 허용 압축 응력을 계산한다.

강종 SM490Y이며, 세장비가 $14 < \lambda \leq 76$ 사이인 구조물의 허용 압축 응력 (f_{ca})은 가시설에 따른 증가계수 1.5, 강재의 재사용에 따른 감소계수 0.9를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{ca} &= [2100 - 15(\lambda_{e,x} - 14)] \times 1.5 \times 0.9 \\ &= 2199.6 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

조립 기둥의 허용 압축 응력 (f_{ca})은 2199.6 kgf/cm^2 으로 IPS 중간 버팀보의 압축 응력 (f_c) 1557.47 kgf/cm^2 보다 크므로 조립 기둥에 대한 안전성은 확보된 것으로 설계된다.

4.2 좌굴 해석 및 합성 응력 검토

중간 버팀보의 좌굴 해석 및 합성 응력을 검토하기 위해서 MIDAS를 사용하여 그림 14와 같은 유한요소해석 모델을 작성하였다.

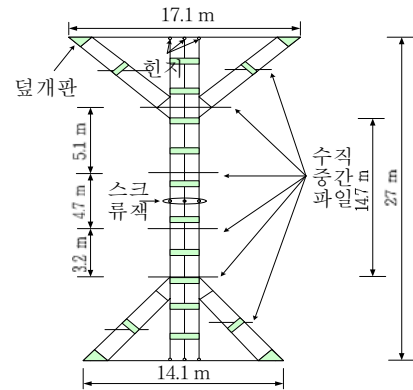


그림 14. Structural analysis model

해석모델에 요소는 표 2와 같이 보요소와 판요소가 사용되었고, 판요소는 케이블 정착장치 덮개판으로 H-형강 부재의 상·하로 배치되어 시공되므로 주부재로 사용되는 H-형강 플랜지 두께의 두배를 사용하였다.

표 2. Element properties of structural analysis model

Member	Element	Material property	Cross-section	Load condition
① IPS wale	Beam	SM490Y	H-350×350×12×19	Earth pressure
② Strut	Beam		H-350×350×12×19	.
③ Strut bracing	Beam		H-350×350×12×19	.
④ Support region	Plate		t-38mm	.

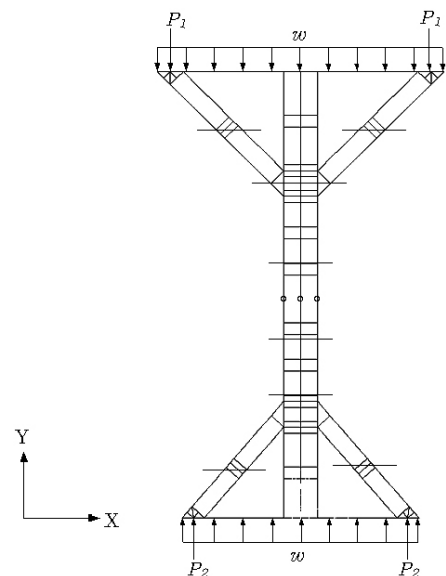


그림 15. Load case of structural analysis model

IPS 중간 버팀보에 적용되는 하중으로 그림 15와 같이 토

압(w)이 30 tf/m가 재하되고 있다. 스트럿 브레이싱 바깥부(IPS 띠장부)에 작용하는 토압은 집중하중으로 치환하여 스트럿 브레이싱 지점부에 각각 P_1 (148.5 tf)과 P_2 (193.5 tf)로 재하하였다. 지점조건은 표 3과 같다.

표 3. Supports boundary conditions

경계조건	구속 지점
X 구속	중간 버팀보와 띠장의 교차점
Y 구속	중간 버팀보 중앙 스크류잭
Z 구속	수직중간파일, 띠장 전체

4.2.1 중간 버팀보의 좌굴 해석

작성된 중간 버팀보의 전산해석모델의 좌굴 해석을 통해 구조물의 고유값(Eigenvalue)을 구한다. 정적 해석 및 좌굴 해석으로부터 얻어진 축력과 모멘트, 고유값등을 이용하여 허용 압축 응력과 허용 휨 응력, Euler의 좌굴 응력을 구한 후 합성응력 검토를 실시해 구조물의 안전성을 판단한다.

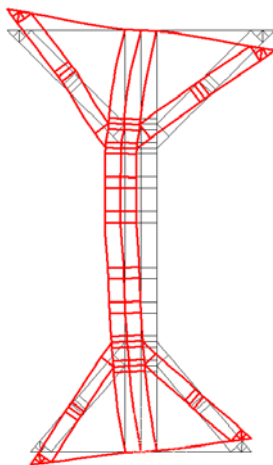


그림 16. Buckling Mode

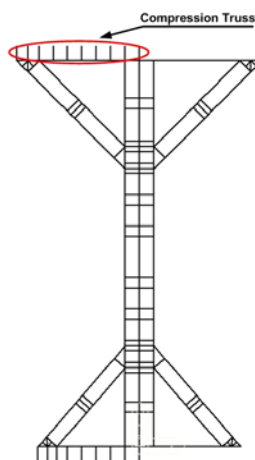


그림 17. Buckling analysis model including soil springs

좌굴 해석시 압축력 전달트러스 요소를 사용할 경우 좌굴

해석 수행이 불가하다. 따라서 지반을 모사한 압축력 전달 트러스 요소를 제거 후 좌굴 해석을 수행하였을 때, 중간 버팀보가 지반에 대하여 압축력을 발생시키는 부분만을 선택하여 일반 트러스 요소를 사용하여 좌굴해석을 수행한다. 그림 16은 지반 스프링을 무시한 경우 좌굴 모드로서 띠장이 지반을 파고드는 쪽에 그림 17처럼 지반 스프링 요소를 추가하여 실 구조물의 좌굴 거동과 일치하게 만들어 정확한 고유값을 계산한다.

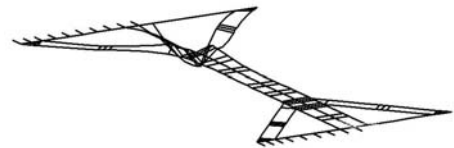


그림 18. Buckling Mode 1

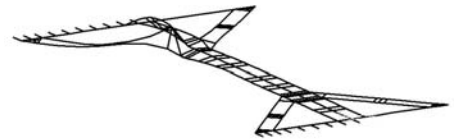


그림 19. Buckling Mode 2

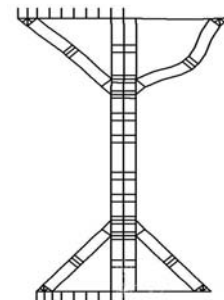


그림 20. Buckling Mode 3

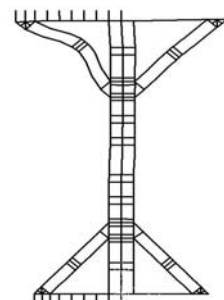


그림 21. Buckling Mode 4



그림 22. Buckling Mode 5

그림 18부터 그림 22까지는 IPS 중간 버팀보의 좌굴모드를 보여주는 것으로 그림 18과 그림 19는 상부 면외 좌굴을, 그림 20와 그림 21은 상부 면내 좌굴과 중앙부의 면내 좌굴을 보여주고 있다. 그리고 그림 22는 하부 면외 좌굴을 나타낸 것이다. 본 IPS 중간 버팀보에 하중 재하시 상부에서 먼저 상부 면외 좌굴이 발생한 다음 계속적인 하중에 대해 상부 면내 좌굴 및 중앙부 면내 좌굴, 하부의 면외 좌굴 순으로 발생한다.

모든 면외 좌굴은 강축으로 휘므로 강축에 대한 안전성 검토를 실시하고, 면내 좌굴은 약축에 대해 좌굴이 발생하므로 약축에 대한 검토를 수행한다.

표 4는 중요 부재 위치에 따른 좌굴 형태와 고유값을 나타낸 것이다.

표 4. Buckling Mode and eigenvalue

Buckling mode	Eigenvalue	좌굴 형태
Mode 1	5.04	상단부 면외 좌굴
Mode 2	7.40	상단부 면외 좌굴
Mode 3	7.77	우측 상단부 면내 좌굴
Mode 4	8.07	좌측 상단부 면내 좌굴
Mode 5	10.08	하단부 면외 좌굴

4.2.2 좌굴해석을 통한 허용응력 산출

중간 버팀보 구조물이 받는 축력과 모멘트는 MIDAS 전산 프로그램을 이용하여 구한 결과는 그림 23과 그림 24에 도시되어 있으며, 주요검토위치(①~⑦)에서 발생하는 축력과 모멘트를 표 5에 나타내었다.

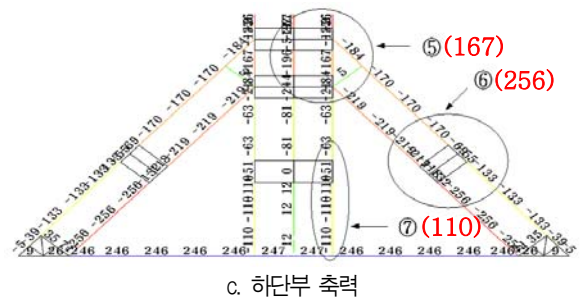
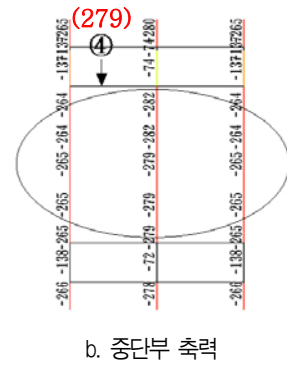
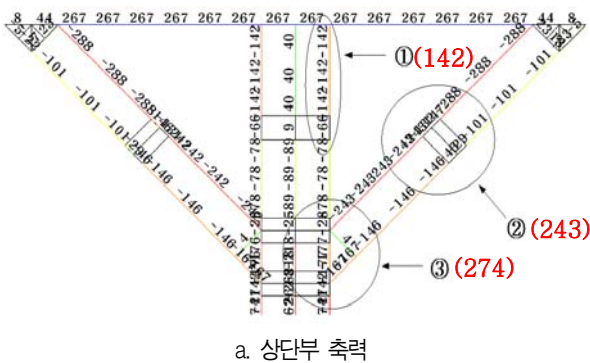


그림 23. Axial force

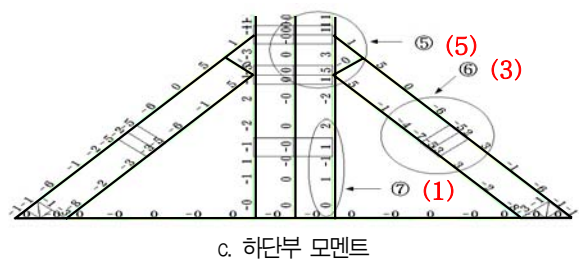
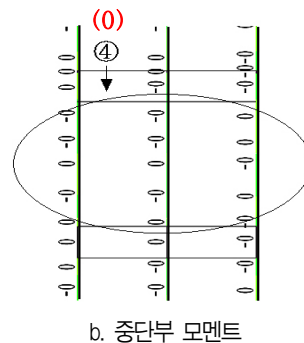
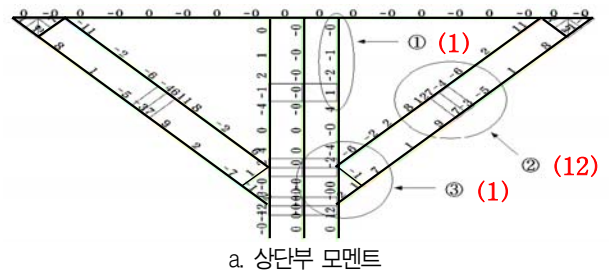


그림 24. Moment

표 5. Axial force and moment[(tf, tf · m)]

검토 위치	축력	모멘트
①	142	1
②	243	12
③	274	1
④	279	0
⑤	167	5
⑥	256	3
⑦	110	1

3.3절에 설명한 바와 같이, 정적 해석을 통해 얻어진 축력과 좌굴 해석을 통해 계산된 부재별 고유값을 이용하여 좌굴 하중에 대한 유효 좌굴 길이를 산출한 후 허용 응력을 도출한다. 표 6에 허용축응력과 휨 응력이 계산되어있다.

이때 검토 위치 ④번에서는 면내 좌굴 모드가 지배하므로, 단면 2차 모멘트와 회전 반경을 약축에 대한 값(빋금친 부분)을 사용하였다. 그 외의 검토 위치에서는 면외 좌굴 모드가 지배하므로, 강축에 대한 값을 사용하였다.

허용 압축응력 계산 결과, 식(16)에서 기술한 조립기등으로 치환한 중간 버팀보의 허용 축응력은 2200 kgf/cm^2 이고 좌굴해석을 통하여 계산된 허용응력은 2293 kgf/cm^2 으로서 약 4%차이를 보임을 알 수 있다.

표 6. Allowable stress value

검토 위치	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
고유값	5.04	5.04	5.04	7.77	10.08	10.08	10.08
부재축력	142	243	274	279	276	256	110
좌굴하중	715.7	1224.7	1381.0	2167.8	2782.1	2580.5	1108.8
I_x (cm^4)	40300	40300	40300	40300	40300	40300	40300
I_y (cm^4)	13600	13600	13600	13600	13600	13600	13600
유효 좌굴 길이	1080.3	825.8	777.7	360.6	547.9	568.9	867.9
r_x (cm)	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
r_y (cm)	8.84	8.84	8.84	8.84	8.84	8.84	8.84
세장비	71.073	54.331	51.166	40.791	36.048	37.430	57.101
허용압축 응력	1679.3	2173.9	2082.4	2292.5	2388.5	2360.0	2087.5
L/b	30.86	23.57	22.22	10.30	15.65	16.25	24.80
허용 휨응력	1209.8	1642.8	1723.0	2431.1	2113.3	2077.7	1569.8

4.2.3. 합성 응력 검토

허용 축방향 압축 응력과 허용 휨 압축 응력이 산출되면 안전성 검토를 실시한다. 표 6에서 구한 허용 압축 응력과 허용 휨 응력의 값을 이용하여 표 8과 같이 합성응력비를 계산한다. 표 7에서 계산된 응력비를 그림 25에 도시하였다.

표 7. Result of the combined stress check

검토 위치	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
P	142	243	274	279	276	256	110
M	1	12	1	0	5	3	1
단면적	174	174	174	174	174	174	174
단면계수	2300	2300	2300	776	2300	2300	2300
f_c (kg/cm^2)	816.1	1396.6	1574.7	1603.4	1586.2	1471.3	632.2
$f_b(\text{kg/cm}^2)$	43.478	369.565	43.478	0.000	43.478	130.435	43.478
f_o/f_{ca}	0.486	0.642	0.756	0.699	0.664	0.623	0.303
$f_b / f_{bd}(1-f_o/f_e)$	0.054	0.340	0.038	0.000	0.025	0.076	0.033
K	0.54	0.982	0.794	0.699	0.689	0.699	0.336
판정	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

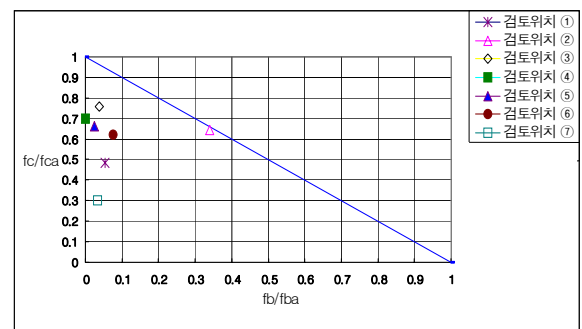


그림 25. Combined the stress diagram

모든 검토 부재의 합성응력 비가 그림 25에서 보는 바와 같이 K값이 1이하로 나타나므로 본 IPS 중간 버팀보의 안전성이 확보된 것으로 판명되었다.

특히, 중간 버팀보 주부재와 경사브레이싱의 연결부 및 경사브레이싱부에 K값이 각각 0.794 및 0.982로서 다른 부재들보다 상대적으로 큰 응력이 발생함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는, 프리스트레스를 이용한 가시설 공법(IPS)에 적용되는 중간 버팀보의 거동 해석 및 설계절차에 대한 연구를 수행하였다. 중간 버팀보를 조립단면 기등으로 치환한

경우의 좌굴거동 및 전체 구조시스템의 좌굴해석을 통하여 허용압축응력을 계산하고 합성응력검토를 수행하여 IPS 중간 버팀보의 안전성을 평가하였다.

본 논문에서 제시한 형태의 IPS 중간 버팀보의 좌굴 안전성은 상단부, 중앙부, 하단부에 대하여 좌굴 고유치가 5.0, 7.8, 10.1로서 충분한 안정성이 확보됨을 확인하였다. IPS 중간 버팀보의 좌굴에 대한 고유치와 정적 해석을 통해 부재별 유효 좌굴장을 계산하고 이로부터 합성응력 검토를 수행한 결과, 주부재와 경사브레이싱의 연결부 및 경사브레이싱부에서 다른 부재들보다 상대적으로 큰 응력이 발생함을 확인하였다. 특히, 허용 압축응력 계산 결과, 식(16)에서 산출한 조립기둥으로 치환한 중간 버팀보의 허용응력이 전산해석모델의 좌굴해석을 통하여 계산된 허용응력에 비하여 약 4% 작은 값을 제시함을 알 수 있었다. 향후 다양한 형태의 중간 버팀보에 대한 안전성평가를 기초로 하여 조립기둥으로서의 설계 절차를 확립해야하며, 더불어 비탄성 좌굴해석을 통한 극한 거동 분석에 대한 연구도 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 저자는 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김낙경(1998) 사질토에 시공된 앵커토류벽의 토압분포에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제4권, 제5호, pp. 17-28.
- 김성보, 한만엽, 김문영, 김낙경, 지태석(2005) 혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS)공법에 적용되는 띠장의 설계 및 해석, 한국전산구조공학회논문집, Vol. 18, No. 1, pp. 79-91.
- 김재관, 이해성, 정충기, 양태석(1996.) 탄소성 지반스프링 모델을 사용한 지반굴착 해석에서의 해의 유일성, 대한토목학회논문집, 제16권 III-3호, pp. 295-301.
- 박종식, 김중우, 김낙경, 이영생, 한만엽(2003) IPS흙막이 공법 I-기본원리, 대한토목학회학술발표회논문집, pp. 3775- 3778.
- 장승필, 김문영, 김성보(1999) 구조안정론, 서울대학교 출판부.
- 최인걸, 조현모, 류승철,(1999) 가시설 안전성 검토에 관한 인천국제공항 시공사례 연구, 한국지반공학회학술발표회 논문집, pp. 97-100.
- 한만엽, 김문영, 김성보, 박동현(2003) 혁신적 프리스트레스트 IPS 띠장의 휨강성에 관한 이론적 연구, 대한토목학회학술발표회논문집, pp. 3754-3759
- MIDAS MIDAS CIVIL Getting Started & Tutorials, POSCO Engineering&Construction Co., Ltd., pp. 136-156.

(접수일자 : 2005. 7. 1 / 심사일 2005. 7. 18 /
심사완료일 2005. 9. 23)