

혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS)공법에 적용되는 띠장의 설계 및 해석

Analysis and Design of Wale in Innovative Prestressed Support(IPS) System

김 성 보† 한 만 업* 김 문 영** 김 낙 경** 지 태 석***
Kim, Sung-Bo Han, Man-Yop Kim, Moon-Young Kim, Nak-Kyung Ji, Tea-Sug
(논문접수일 : 2004년 10월 12일 ; 심사종료일 : 2005년 3월 3일)

요 지

본 논문에서는 프리스트레스트를 이용한 가시설 공법(IPS)에 적용되는 띠장의 거동의 해석 및 설계절차에 대한 연구를 수행하였다. 띠장에 초기장력이 도입되는 구조계는 탄성지반위에 놓인 보이론에 의하여 부재력이 산출되고, 토압에 의한 부재력은 장력을 부정정력으로 취하여 부정정 구조해석을 통하여 띠장의 축력 및 휨모멘트를 계산하였다. 지반은 압축력 전담요소, 케이블은 인장력 전담요소를 사용하여 등분포 토압 및 편토압을 받는 띠장의 전산해석을 수행하였다. 기존의 가시설 설계에 적용되는 토압을 적용하여 IPS 띠장설계를 실시하였고, 긴장력과 설계토압에 의한 축력과 휨모멘트를 계산하여 축응력과 휨응력을 도출하고 합성응력검토를 수행하였다.

핵심용어 : 프리스트레스트, 가시설, 띠장, 합성응력

Abstract

The behaviors and design procedures of wale in innovative prestressed support(IPS) system are presented in this paper. Using the theory of the beam on elastic foundation, the member forces of the wale under initial pretension are evaluated. Choosing cable tensions as redundant forces, member forces subjected to earth pressure are calculated by the statically indeterminate analysis. The computer analysis model under uniform and non-uniform earth pressure is constructed using beam element for the IPS wale, tension-only element for cable, and compression-only element for soil. Axial forces and bending moments of IPS wale under initial pretension and design earth pressure are calculated. The combined stresses due to these axial force and bending moment are estimated to satisfy the design formula.

keywords : IPS, prestress, support, wale, combined stresses

1. 서 론

토류 가시설은 지하구조물을 건설할 때 지하를 굴착한 뒤 지반이 붕괴되는 것을 막기 위하여 굴착된 지하 공간에 설치되는 임시구조물로서, 토목 현장에는 지하철 건설 등에 많이 사용되고 있으며, 건축의 경우에서도 지하 공간의 활용이 중요해짐에 따라 그 사용이 확대되고 있다. 하지만 현재의 가시설 공법의 경우, 수많은 버팀보가 비효율적으

로 사용되어 비경제적일 뿐만 아니라 주위지반 침하의 우려까지 있어 효율적인 가시설 공법 및 설계지침의 마련이 절실한 실정이다. 기존의 대부분의 가시설 공법은 주로 H형강의 휨 저항력과 압축 저항력을 이용하여 토압을 지지하는 구조이다. 그러나 H형강의 휨 저항력과 압축 저항력은 한계가 있어서 토압을 지지하기 위해서는 많은 수의 H형강을 사용하여 촘촘히 설치해야 하기 때문에 작업공간이 좁아져 시공에 많은 어려움이 발생한다.

† 책임저자, 정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수
전화: 043-261-3241 ; Fax: 043-275-2377
E-mail: sbkim@chungbuk.ac.kr

* 정회원 · 아주대학교 토목설계공학과 교수

** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수

*** 충북대학교 토목공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 H형강에 강선을 배치하고 프리스트레스트를 도입하여 H형강의 휨 저항력을 대폭 증가시켜 띠장의 받침 길이, 즉 버팀보의 간격을 기존보다 수배에서 십 여배까지 증가시킨 혁신적인 프리스트레스트 가시설공법(IPS System, Innovative Prestressed support System)이 개발되었다.^{1)~4)}

IPS 공법은, 작업공간을 대폭 확대시킴과 더불어, 기존의 여러 개의 버팀보를 한 곳에 모아 토압을 받치는 구조가 되기 때문에 버팀보의 강재 물량을 줄일 수 있는 공법이다. 즉, 수직과 수평으로 설치된 주로 휨을 받는 부재에 효과적인 프리스트레스트를 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 공법에 적용되는 띠장의 안전성 해석 및 설계 기법을 정립하고자 한다. IPS 띠장의 형식을 결정하고 받침대의 개수 및 긴장력과 토압의 변화에 따른 띠장의 부재력을 산정한다. 계산된 부재력으로부터 산정된 축응력과 휨응력에 의한 합성응력이 설계식을 만족시키는지 평가한다.

2. IPS 공법의 개요

기존의 토류 가시설은 H형강 띠장의 휨 저항력과 버팀보의 압축저항력을 이용하여 토압에 저항하는 개념으로 설계가 되고 있지만,^{5)~8)} IPS공법은 H형강 띠장에 프리스트레싱을 도입하여, 띠장의 휨 저항력을 대폭 증대시킴으로써 기존의 가시설 공법에서 공사에 막대한 지장을 초래하였던 버팀보의 설치간격을 대폭 늘릴 수 있도록 하여 공사비의 절감, 공기단축 및 시공성 증대 등의 효과를 기대할 수 있도록 하였다. IPS공법의 기본 원리는 그림 1과 그림 2에

도시되어 있다. 기존 공법에서는 토압을 지지해 주기 위하여 그림 1에 제시된 바와 같이 5개의 버팀보를 배치하여, 버팀보의 축력으로 토압을 지지한다. 그러나, IPS공법에서는 받침대와 강선에 장력을 발생시켜 재래식 공법에서의 중간 버팀보와 같은 위치에 같은 크기의 지지력을 발휘시킨다. 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, 큰 장력을 가하여 선형하중을 주면 지반 침하를 방지할 수 있어서 도심지 공사에 특히 유리하다.

그림 2는 지하철 공사현장의 수직과 수평보 및 주형보에 모두 프리스트레싱을 도입하여 굴착 및 지보공이 설치된 상태를 보여준다. 이 그림에서 IPS공법의 주요 구성요소인 HPS(Horizontal Prestressed Support), VPS(Vertical Prestressed Support), UPS(Upper Prestressed Support)의 사용방법을 볼 수 있다. 횡방향 토압 및 수직하중을 모두 IPS 시스템으로 지지할 수 있기 때문에 굴착시공이 간편하고 본 구조물에 버팀보 및 중간과일 설치에 따른 구멍이 발생하는 것을 막을 수도 있다.

IPS 공법을 토류 가시설에 적용하는 방법은 관로나 지하철과 같은 토목현장 및 건축현장의 조건에 따라 IPS 띠장의 길이를 자유롭게 변화시키면서 그림 3과 같이 다양하게 적용할 수 있다.

3. IPS 띠장의 부재력

IPS 띠장의 구성 부품은 그림 4와 같이 기존띠장과 연결되는 IPS띠장과 받침대, 받침대브레이싱, 받침대보강재, PS케이블, 지점트러스로 구성된다. 여기서, IPS 띠장과 받침대, 받침대브레이싱으로 구성된 형태를 기본모듈이라 하며, 기본모듈과 지점트러스를 연결하여 다양한 지간을

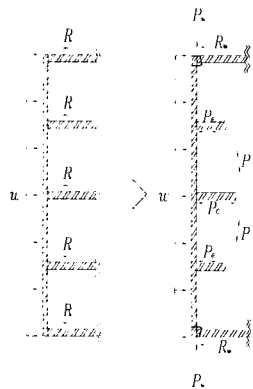


그림 1 Principles of IPS

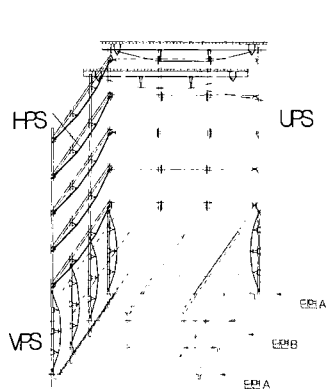


그림 2 General concept of IPS

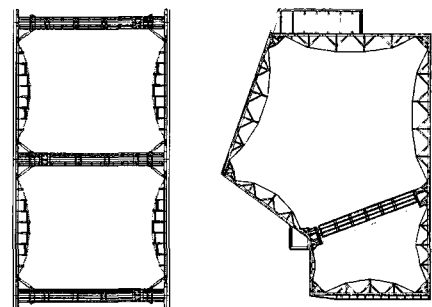


그림 3 Applications of IPS

갖는 IPS 띠장을 구성할 수 있다.

3.1 초기 긴장력

IPS 띠장의 기본거동은 강선의 긴장력으로서 토압을 지지하는 것이다. 따라서 토압에 따른 강선의 소요 장력을 계산하는 과정이 요구되며, 이 과정은 '힘의 평형' 또는 '변위 일치'의 개념을 사용하여 근사적으로 계산할 수 있다.

3.1.1 힘의 평형

그림 5와 같이 전체지간 L에 작용하는 등분포토압(w)을 3개의 받침대에서 균등하게 지지한다고 가정하여 받침대의 수직력(V)을 식(1)에서 얻을 수 있다. 받침대가 지지하는 수직력(V)가 계산되면 각 받침대 끝단에서 힘의 평형방정식을 이용하여 강선 긴장력이 식(1)과 같이 계산된다.

$$V = 0.333wL \quad (1)$$

3.1.2 변위 일치

그림 6은 등분포토압(w)에 의한 하향변위와 받침대의 내력(V)에 의한 상향변위를 나타내고 있다. 변위 일치법에

서는 띠장의 변위가 '0'이 되어야 한다는 조건으로부터 받침대의 수직력(V)을 구한다.

$$\Delta_c (= \frac{5wL^4}{384EI}) = \delta_c (= \frac{1431VL^3}{34992EI}) \quad (2)$$

$$V = 0.318wL \quad (3)$$

이와 같은 변위일치방법에 의한 긴장력의 계산과정은 받침대의 위치, 개수에 따라 복잡한 계산이 수반된다. 하지만 그 결과(V=0.318wL)는 힘의 평형을 이용한 결과 (V=0.333wL)에 비하여 3%정도의 차이를 보이므로, 본 연구에서는 힘의 평형을 이용한 방법으로부터 긴장력을 결정한다.

그림 7은 3-Post 받침대에서 등분포토압(w)이 작용하는 IPS 띠장의 전체 모델을 보여주고 있으며, 식 (4)의 절점의 평형방정식을 통해 요구되는 긴장력을 얻을 수 있다.

$$3V = wL$$

$$\text{Joint C ; } 2P \sin a_2 - V = 0$$

$$\text{Joint B ; } P \sin a_2 - P \sin a_1 + V = 0 \quad (4)$$

$$P \cos a_2 - P \cos a_1 - H = 0$$

$$\therefore P = \frac{wL}{2 \sin a_1}, \quad h_c = h_e + d_i \tan(\sin^{-1}(\frac{\sin a_1}{3}))$$

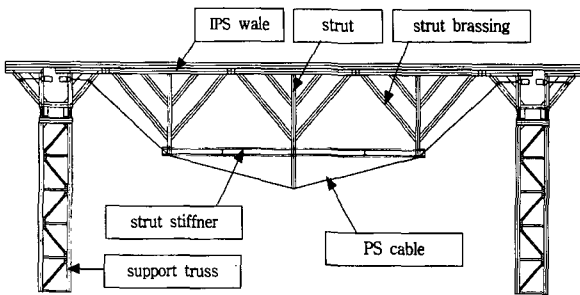


그림 4 Parts of wale in IPS

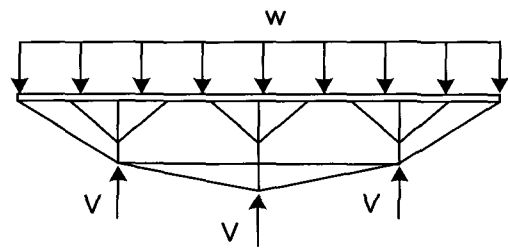


그림 5 Force equilibrium method

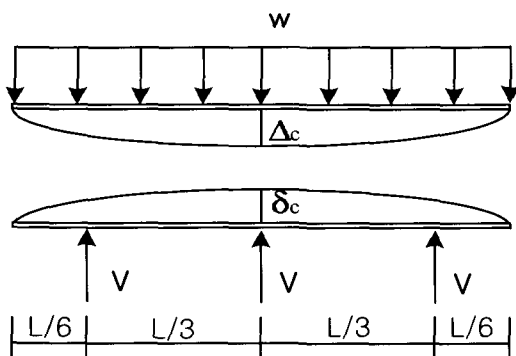


그림 6 Zero displacement method

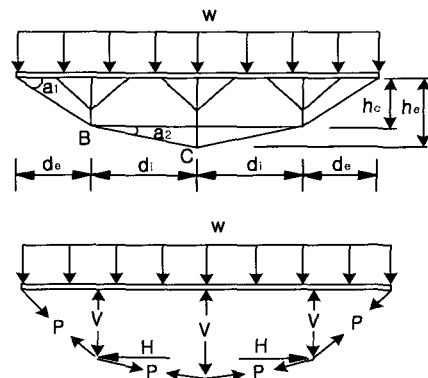


그림 7 Initial cable force

3.2 받침대에 따른 띠장의 부재력

그림 8은 IPS 띠장의 케이블에 초기긴장력(P_0)을 가한 하중조건을 나타내고 있고, 그림 9는 설계토압이 작용할 때의 하중조건을 나타내고 있다. IPS 띠장의 케이블에 초기긴장력이 재하되면 띠장에 휨모멘트와 압축력이 발생한다. 이때 발생하는 띠장의 휨 모멘트는 그림 10과 같이 탄성지반위의 보 이론에 의해 다음과 같이 구할 수 있다(Boresi, 2003).⁹⁾

$$M_x = \frac{V}{4\lambda} C_{\lambda x} \quad (5)$$

여기서, $C_{\lambda x} = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$, $\lambda = \sqrt[4]{\frac{b k_0}{4 EI}}$

식 (5)에서, EI : 띠장의 휨강성, b : 띠장의 폭, k_0 : 지반반력계수이다. 케이블 긴장력의 수직분력(V)이 받침대 및 경사브레이싱을 통하여 균등분할 되어 작용한다고 가정하면 띠장의 휨모멘트(M_w)는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_w = \frac{Q}{4\lambda} [C_0 + 2C_{\lambda e} + 2C_{2\lambda e}], \quad Q = \frac{V}{5} \quad (6)$$

여기서 e : 경사브레이싱의 간격, V : 케이블 장력으로 인하여 받침대에 전달되는 축하중이다.

3.2.1 1-Post 띠장

설계토압이 재하된 경우 발생하는 케이블 장력(P)은 하중법을 적용한 부정정구조의 해석에 의해 구할 수 있다. 이때 받침대는 경사 브레이싱을 무시한 강체 트러스 요소로 가정한다. 그림 11과 같이 1-Post 띠장에서 케이블 장력(X_1)을 부정정력으로 취했을 때 적합조건식은 다음과 같다.^{10)~11)}

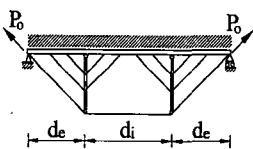


그림 8 IPS wale under

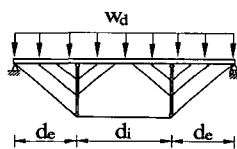


그림 9 IPS wale under initial tension earth pressure

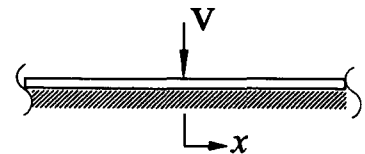


그림 10 Beam on elastic foundation

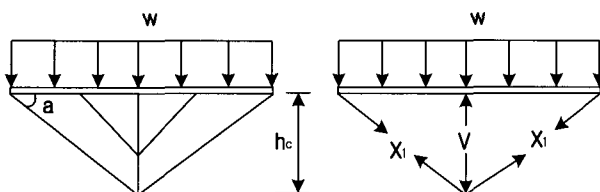


그림 11 1-Post wale under earth pressure

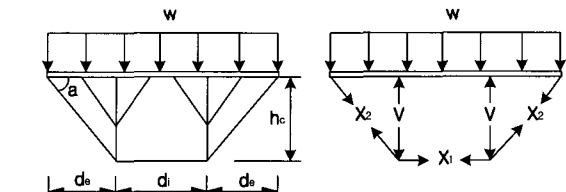


그림 12 2-Post wale under earth pressure

$$fX_1 + \delta = 0, \quad \delta = 2 \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M}{EI} m_1 dx$$

$$f = 2 \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{m_1^2}{EI} dx + \frac{L}{EA} + \frac{1}{EA_t} \left[\frac{L}{\cos a} \right] \quad (7)$$

여기서, EI 와 EA 는 띠장의 휨강성과 축강성이고 EA_t 는 케이블의 축강성이다. 기본구조물에서 토압에 의한 띠장의 휨모멘트(M), 단위장력에 의한 휨모멘트 (m_1)은 각각 다음과 같다.

$$M = \frac{wl}{2} x - \frac{w}{2} x^2, \quad m_1 = -\sin a \cdot x \quad (8)$$

식 (7)으로부터 설계토압 작용시 케이블 장력(X_1)은 다음과 같이 유도된다. 또한 띠장의 압축력(P_w)은 케이블 장력(X_1)으로부터 계산된다.

$$X_1 = \frac{5wL^4 \sin a}{16L^3 \sin a^2 + 192IL \left(\frac{\cos a^2}{A} + \frac{\sec a}{A_t} \right)} \quad (9)$$

3.2.2 2-Post 띠장

그림 12와 같이 2-Post 띠장에서 중앙 경간의 케이블 장력(X_1)을 부정정력으로 취했을 때 적합조건식은 다음과 같다.

$$fX_1 + \delta = 0$$

$$\delta = 2 \int_0^d \frac{M}{EI} m_1 dx + \int_d^{d+d_i} \frac{M}{EI} m_2 dx \quad (10)$$

$$f = 2 \int_0^d \frac{m_1^2}{EI} dx + \int_d^{d+d_i} \frac{m_2^2}{EI} dx + \frac{L}{EA} + \frac{1}{EA_t} \left[\frac{2d_e}{\cos^3 a} + d_i \right]$$

여기서 기본구조물에서 토압에 의한 띠장의 휨모멘트(M), 단위장력에 의한 외측 경간과 중앙경간의 휨모멘트 m_1 , m_2 는 각각 다음과 같다.

$$M = \frac{wl}{2}x - \frac{w}{2}x^2$$

$$m_1 = -\tan a \cdot x, \quad m_2 = -\tan a \cdot d_e \quad (11)$$

식 (6)을 풀면 설계토압 작용시 케이블 장력을 엄밀히 계산할 수 있다. 특히, $d_e = d_i = \frac{L}{3}$ 인 경우 중앙경간의 장력(X_1)과 측경간의 장력(X_2)는 식 (12)와 같고 띠장의 압축력(P_w)은 중앙경간의 장력(X_1)과 동일하다.

$$X_1 = \frac{11wL^4 \tan a}{30L^3 \tan^2 a + 486 \frac{IL}{A} + 162 \frac{IL}{A_t} (1 + 2\sec^2 a_1)}$$

$$X_2 = \frac{X_1}{\cos a}, \quad P_w = X_1 \quad (12)$$

3.2.3 3-Post 띠장

그림 13과 같이 3-Post 띠장에서 중앙 경간의 케이블 장력(X_1)을 부정정력으로 취했을 때 적합조건식은 다음과 같다.

$$fX_1 + \delta = 0$$

$$\delta = 2 \int_0^{d_e} \frac{M}{EI} m_1 dx + 2 \int_{d_e}^{d_e+d_i} \frac{M}{EI} m_2 dx$$

$$f = 2 \int_0^{d_e} \frac{m_1^2}{EI} dx + 2 \int_{d_e}^{d_e+d_i} \frac{m_2^2}{EI} dx + \frac{L}{EA}$$

$$+ \frac{1}{EA_t} \left[\frac{2d_e}{\cos^2 a_1} \cos a_2 + \frac{2d_i}{\cos a_1} \right] \quad (13)$$

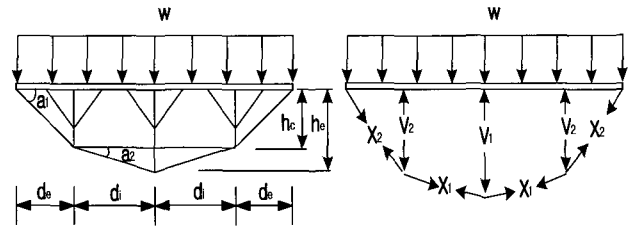


그림 13 3-Post wale under earth pressure

여기서, 기본구조물에서 토압에 의한 띠장의 휨모멘트 (M), 단위장력에 의한 외측 경간과 중앙경간의 휨모멘트 m_1 , m_2 는 각각 다음과 같다.

$$M = \frac{wl}{2}x - \frac{w}{2}x^2$$

$$m_1 = -\cos a_2 \cdot \tan a_1 \cdot x$$

$$m_2 = -\cos a_2 \cdot \tan a_1 \cdot d_e - \sin a_2 \cdot (x - d_e) \quad (14)$$

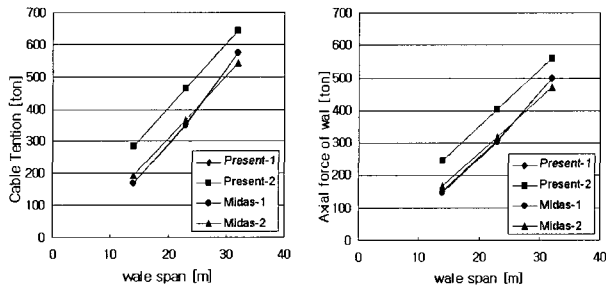
식 (13)을 풀면 설계토압 작용시 내측경간의 장력(X_1)과 외측경간의 장력 (X_2), 띠장의 압축력(P_w)은 식 (15)와 같다.

$$X_1 = -\frac{\delta}{f}, \quad X_2 = \frac{X_1 \cdot \cos a_2}{\cos a_1}, \quad P_w = X_1 \cdot \cos a_2 \quad (15)$$

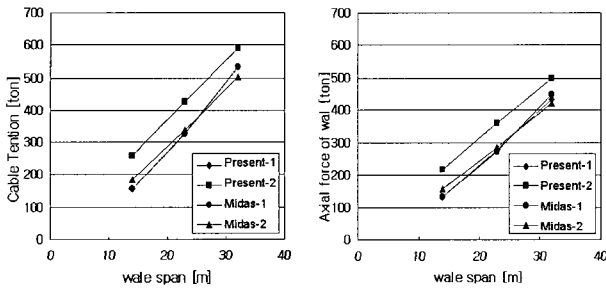
상기와 같이 유도된 식들의 검증을 위하여 범용구조해석 프로그램인 MIDAS¹²⁾를 이용해서, 전산 구조해석을 수행하여 본 논문에서 유도된 식에 의한 결과와 비교하였다. 전산 해석에 사용된 요소는 beam요소(띠장), 인장력전달 truss요소(강선), truss요소(받침대)를 사용하였고 모든 부재는 H-350×350×12×19형강이며, 케이블의 직경은 8cm이고 토압 하중은 20 tf/m을 사용하였다. MIDAS에 의한 해석 모델은 받침대의 경사브레이싱을 무시하는 경우(MIDAS-1)와 고려하는 경우(MIDAS-2)를 구분하여 작성하였다. 받침대의 개수에 따라 IPS띠장을 구성하는 단위모듈의 부재길이(9m)와 좌우받침대 부분의 길이(각 2.5 m)를 포함하여 띠장의

표 1 Member forces of IPS wale under earth pressure

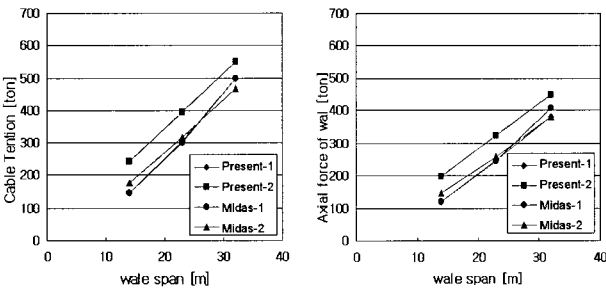
Post	L(m)	h_e (m)	h_c (m)	P_e (tf)				P_w (tf)			
				Present-1	Present-2	MIDAS-1	MIDAS-2	Present-1	Present-2	MIDAS-1	MIDAS-2
1	14	4.0	4.0	171	283	171	194	149	246	148	169
		4.5	4.5	158	259	157	185	133	218	132	155
		5.0	5.0	147	241	147	178	120	197	119	145
2	23	4.0	4.0	355	464	351	367	308	403	305	318
		4.5	4.5	328	426	323	339	275	359	272	285
		5.0	5.0	303	396	301	317	247	323	245	258
3	32	4.0	5.0	574	645	574	543	498	561	498	472
		4.5	5.5	534	592	533	502	436	498	448	422
		5.0	6.0	500	551	500	469	381	449	407	382



(a) $h_e=4\text{m}$



(b) $h_e=4.5\text{m}$

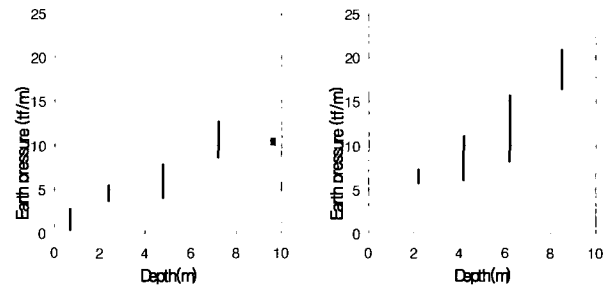


(c) $h_e=5\text{m}$

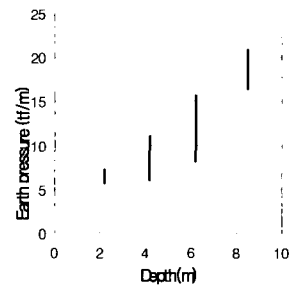
그림 14 Cable tension and axial force of wale

길이를 가정하였다. 또한 외측경간과 내측경간의 길이는 각각 7m, 9m 로서 일정하다($d_e=7\text{m}$, $d_i=9\text{m}$) 즉, 2-Post 띠장의 경우 IPS모듈의 부재길이($9\text{m}\times 2\text{개}=18\text{m}$)와 좌우 받침대 부분의 길이(각 2.5 m)를 포함하여 띠장의 길이를 $L = 23\text{m}$ 로 하였다.

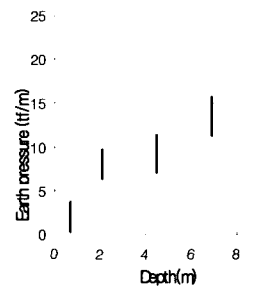
표 1 및 그림 14에서, 받침대의 높이(h_c)에 따른 PS장선의 장력(P) 및 띠장에 발생하는 축력(P_w)을 본 연구에서 유도된 식 및 전산해석결과와 비교하여 나타내었다. 본 논문에 의한 결과는 부정정해석을 통하여 엄밀히 유도된 식을 이용한 결과(present-1)와 전체토압을 받침대의 수직력이 균일하게 부담한다는 근사적 가정을 도입한 결과(present-2)를 구분하여 제시하였다. 본 논문에서 유도된 식을 이용하여 케이블 장력을 계산한 결과(present-2)는 경사 브레이싱을 무시한 전산해석 결과(MIDAS-1)와 최대 1.5%의 차이를 보이고, 띠장의 축력은 6.8%의 차이를 보인다. 한편, 경사 브레이싱을 고려한 전산해석 결과(MIDAS



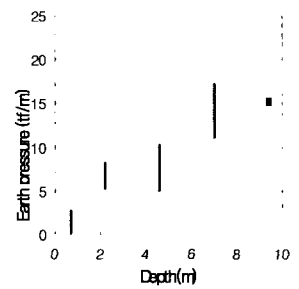
(a) Location 1



(b) Location 2



(c) Location 3



(d) Location 4

그림 15 Earth pressure due to excavation

-2)와 케이블 장력 및 축력이 각각 최대 17.4%, 17.9%의 차이를 보인다. 또한, 지간이 길어질수록 present-2의 결과는 present-1의 결과와 근접하여 3-Post 띠장의 중앙 받침대의 편심이 5m일때 10%정도 안전측으로 계산됨을 확인하였다.

4. IPS 띠장의 설계 및 해석

4.1 IPS 띠장의 설계

그림 15는 기존의 지하철 가시설 공사 현장에서 적용된 굴착깊이에 따라 발생하는 토압의 최대·최소크기를 기존 받침대 설치 위치에 따라 나타낸 것이다. 본 IPS공법을 지하철 가시설 현장에 적용하기 위하여 아래의 데이터를 참고하여 띠장 설계에 필요한 설계토압하중(w_d)을 20 tf/m으로 설정하였다.

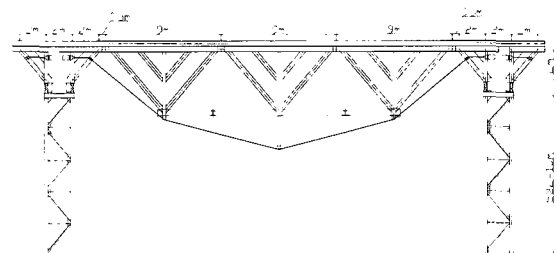


그림 16 IPS wale system

그림 16과 같은 3-Post IPS 띠장과 같은 형식으로 띠장의 형태를 결정하고 긴장력 및 설계토압에 의한 부재력을 산정한다. 외측 받침대의 편심을 4.5m로 하면 식 (4)에 의하여 설계 긴장력 및 중앙 받침대의 편심은 각각 $P_d = 592tf$, $h_c = 6.15m$ 이다.

초기긴장력 $P_d = 592tf$ 재하시 띠장의 축력은 $P_w = P_d \cos \alpha_1 = 498tf$ 이고, 띠장의 모멘트는 식 (5)에 의하여 다음과 같이 산정할 수 있다. 이때 지반반력계수는 표 2에서 지반을 중간정도 다져진 모래라고 가정한 지반반력계수(4000tf/m³)을 사용하였고 IPS 띠장은 H-350×350×12×19의 단면을 사용하였으며 그 재원은 표 3과 같다.

표 2 Coefficient of subgrade reaction classified by soil⁹⁾

Soil types	Coefficient of subgrade reaction (tf/m ³)
Loose sand	510~612
Medium sand	1019~8155
Dense sand	64220~12844
Clayey sand	3160~8255
Silty sand	2446~4893

표 3 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]	Z [cm ³]
173.9	40300	13600	15.2	8.84	2300

$$M_w = \frac{wL/3}{20\lambda} [C_0 + 2C_{\lambda e} + 2C_{2\lambda e}] = 50tf \cdot m$$

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{b k_0}{4EI}} = 0.451$$

또한 설계토압 재하시 띠장의 축력은 표 1의 present-1의 설계식에 의하면 498tf이고 모멘트는 받침대 브레이싱 간격을 지간으로 취하여 설계모멘트를 구하면 $20 \times 2^2 / 10 = 8tf \cdot m$ 이다. 한편, 도로교시방서에서 규정된 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 구조물의 설계조건은 다음과 같다.

$$\frac{f_c}{f_{ca}} + \frac{f_b}{f_{ba}(1-f_c/f_e)} = K \leq 1 \quad (16)$$

띠장에 사용된 H형강의 강종이 SM490인 경우 허용응력은 가시설에 따른 증가계수 1.5, 강재 재사용에 따른 감소계수 0.9를 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ca} = \begin{cases} 2100 \times 1.5 \times 0.9 & (\lambda_y = L_s/r_y \leq 14) \\ (2100 - 15 \times (L_s/r_y - 14)) \times 1.5 \times 0.9 & (14 < \lambda_y = L_s/r_y \leq 76) \\ 12000000 / (4500 + (L_s/r_y)^2) \times 1.5 \times 0.9 & (76 < \lambda_y = L_s/r_y) \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{ba} = \begin{cases} 2100 \times 1.5 \times 0.9 & (L_s/b \leq 3.5) \\ [2100 - 44 \times (L_s/b - 3.5)] \times 1.5 \times 0.9 & (3.5 < L_s/b \leq 27) \end{cases} \quad (18)$$

$$f_c = \frac{\pi^2 \times E}{\lambda_x^2 \times 0.9} \quad \text{여기서, } \lambda_x = \frac{L_s}{r_x} \quad (19)$$

띠장의 유효좌굴 길이를 받침대 경사 브레이싱 간격인 2m로 택하면 허용압축응력 (f_{ca}), 허용휨응력 (f_{ba}), Euler좌굴 응력 (f_c)는 각각 2660 kgf/cm², 2703 kgf/cm², 62360 kgf/cm²이다. 한편, 동일한 H-350×350×12×19형강이 기존 띠장과 IPS 띠장에 사용될 경우 두개의 띠장이 부분적 볼트연결 및 용접연결을 무시한 완전 비합성 연결된다는 가정을 도입하면 전체 띠장 단면의 축강성과 휨강성은 H-350×350×12×19단면의 두 배가 된다(그림 17).

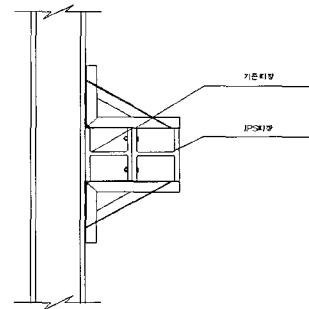


그림 17 Connection form of IPS wale

표 4에서 합성응력을 검토한 결과, 합성응력이 도로교시방서에서 규정된 축력과 휨을 받는 설계조건식을 모두 만족시킴을 알 수 있다.

표 4 Combined stress check

Load case	P (tf)	M (tf·m)	f _c (kgf/cm ²)	f _b (kgf/cm ²)	f _c /f _{ca}	f _b /[f _{ba} (1-f _c /f _e)]	K
Initial pretension	498	50	1360	1085	0.538	0.321	0.859
Design earth pressure	498	8	1360	174	0.538	0.035	0.573

4.2 IPS 띠장의 전산해석

4.2.1 전산해석 모델

전 절에서 설계된 3-Post IPS 띠장의 해석을 위하여, 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용해서, 그림 18과 같은 유한요소해석 모델을 작성하여 전산 구조해석을 수행하였다. 표 5에 나타난 바와 같이 사용요소는 beam요소, 인장력전담 truss요소, 압축력전담 truss요소를 사용했고, 띠장의 탄성계수는 기존띠장과 IPS띠장이 완전 비합성 연결됨을 가정하여 강재의 탄성계수의 두 배 값을 직접 입력하였다. 하중조건은 시공단계를 고려하여 표 6과 같이 적용하였다.

한편, SWPC7B PS케이블 1개의 공칭면적(A)은 1.387cm^2 이고 설계 긴장력의 1.3배인 690 tf를 가하기 위해 36가닥을 사용 한다면 총면적(A)은 $1.387 \times 36 = 49.932\text{cm}^2$ 이 필요하다. 즉, PS케이블을 인장력전담 트러스 요소로 모델링하였을 때 단면적이 $\pi d^2/4 = 49.932\text{cm}^2$ 이라는 조건으로부터, $d = 7.97\text{cm}$ 가 요구된다. 따라서 본 논문에서 PS케이블의 적용 직경은 $\phi 0.08\text{m}$ 를 사용하였다.

토압과 띠장 횡변위와의 관계는 그림 19와 같다. 즉, 지반의 강성은 수동토압 작용 시 "0" 이고 수동토압 작용 시 일정한 강성을 갖는다. 이와 같은 지반특성을 고려하여 본 해석에서는 지반을 띠장 횡변위에 저항하는 압축력 전

담 스프링으로 모사하고 스프링상수를 인장력 발생 시에는 "0", 압축력 발생 시에는(지반반력계수×부담면적)의 값을 갖도록 한다.

표 6 Load case of structural analysis model

Load case	Initial pretension(tf)	Soil pressure (tf/m)
1	$P_d = 531$	$w_d = 20$
2	$0.7P_d = 372$	$w_d = 0$
3	$0.7P_d = 372$	$0.7 w_d = 14$
4	$0.7P_d = 372$	$w_d = 20$
5	$P_d = 531$	$1.3 w_d = 26$

지반을 중간정도 다져진 모래라고 가정한 지반반력계수(4000tf/m^3)을 사용하면, H350띠장의 경우 지반스프링의 폭은 0.35 m, 지반스프링 간격은 1 m 이므로 지반스프링상수는 $K_s = 1400\text{tf/m}$ 이 된다. 따라서 지반스프링을 모사한 압축력 전담 트러스 요소의 단면적은 $A = K_s \times L / E = 6.67 \times 10^{-5}\text{m}^2$ 이고, 원형단면 압축력 전담 트러스 요소의 직경은 $d = 0.03\text{m}$ 이다. 설계긴장력으로 채하시킨 Pretension하중은 수평, 수직 분력으로 나누어 인장력 전담 truss요소의 각 절점에 입력하였다. 그림 20은 하중조건 1에 대한 해석결과인 처짐형상이고 그림 21과 그림 22은 각각 휨모멘트도 및 축력도이다.

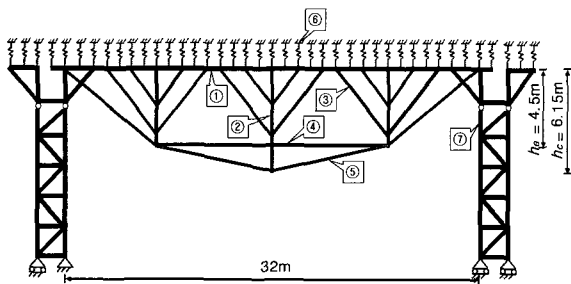


그림 18 Structural analysis model

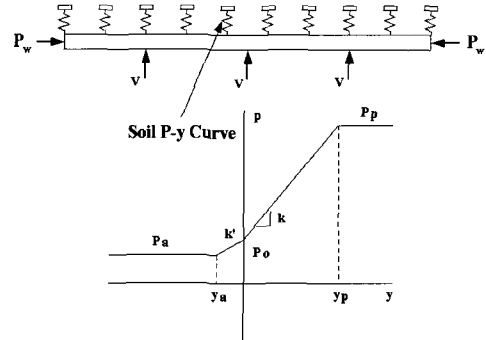


그림 19 P-δ curve for soil

표 5 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-300×305×15×15	
③ Strut bracing	Beam		H-300×305×15×15	
④ Strut stiffener	Beam		H-300×305×15×15	
⑤ PS cable	Tension truss		Φ 0.08 m	Initial pretension
⑥ Soil	Compression truss		Φ 0.03 m	
⑦ Support Truss	Beam		H-350×350×12×19	

4.2.2 합성응력 검토

식 (16)에서 구한 f_c/f_{ca} 을 종축에, $f_b/f_{ba}(1-f_c/f_e)$ 를 횡축에 도시한 합성응력도를 그림 23-24 및 표 7-8에 나타내었다. 그림 23은 지점부의 합성응력도이고, 그림 24는 내측연결부의 합성응력도이다. 합성응력을 검토한 결과, 띠장의 지점부와 내측연결부에서 합성응력이 도로교시방서에서 규정된 축력과 휨을 받는 설계조건식을 모두 만족시

킴을 알 수 있다.

초기 강선의 긴장력만 재하되는 경우(0.7 P_d)에서부터 설계장력·설계토압에 작용하는 경우(P_d , w_d) 및 과토압이 발생하는 경우(P_d , 1.3 w_d)에 부재 축응력은 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 지점부에서는 각 시공단계에서 강선 긴장력과 토압과의 평형조건에 따라 휨응력의 변화폭이 크게 나타났지만 내측연결부에서는 거의 일정함을 확인하였다.

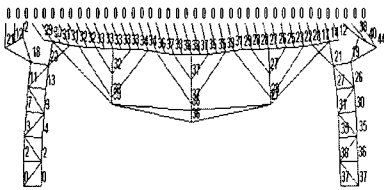


그림 20 Deformed shape of load case 1(mm)

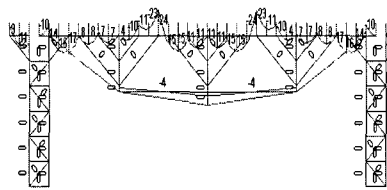


그림 21 Bending moment of load case 1(tf·m)

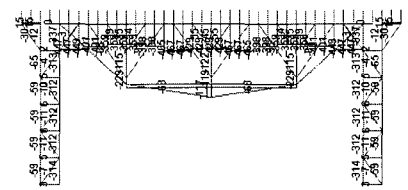


그림 22 Axial force of load case 1(tf)

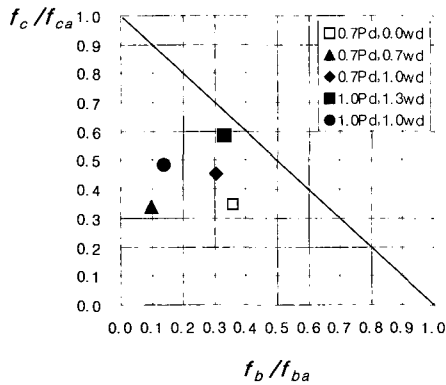


그림 23 Combined stress diagram of wale at support region

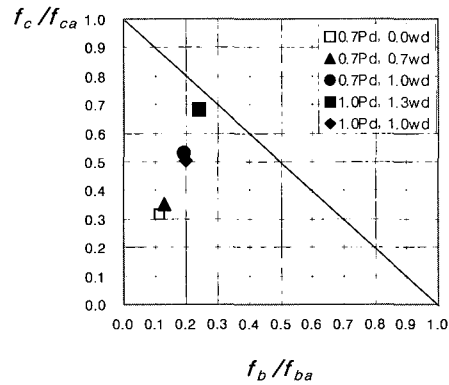


그림 24 Combined stress diagram of wale at interior connection region

표 7 Combined stress check at support region

Load case		P(tf)	M(tf·m)	f_c (kgf/cm ²)	f_b (kgf/cm ²)	f_c/f_{ca}	$f_b/[(f_{ba}(1-f_c/f_e))]$	K
Pretension	Soil pressure							
P_d	w_d	449	17	1290.97	369.57	0.485	0.1395	0.624
0.7 P_d	0	320	44	920.070	956.52	0.345	0.3591	0.704
0.7 P_d	0.7 w_d	314	12	902.82	260.87	0.339	0.0979	0.437
0.7 P_d	w_d	418	37	1201.84	804.35	0.451	0.3033	0.755
P_d	1.3 w_d	543	40	1561.24	869.57	0.586	0.3299	0.916

표 8 Combined stress check at interior connection region

Load case		P(tf)	M(tf·m)	f_c (kgf/cm ²)	f_b (kgf/cm ²)	f_c/f_{ca}	$f_b/[(f_{ba}(1-f_c/f_e))]$	K
Pretension	Soil pressure							
P_d	w_d	467	24	1342.73	521.73	0.504	0.1972	0.701
0.7 P_d	0	293	14	842.44	304.35	0.316	0.1141	0.430
0.7 P_d	0.7 w_d	328	16	943.07	347.82	0.354	0.1306	0.485
0.7 P_d	w_d	491	23	1411.73	500	0.530	0.1892	0.719
P_d	1.3 w_d	631	29	1814.26	630.43	0.681	0.2401	0.922

4.2.3 편토압

그림 25는 기본모델에서 긴장력은 유지시키고 편토압이 작용하는 두가지 경우를 나타낸다. 이때 토압변화 비율이 일정하게 하도록 구속조건($m \cdot n = 1$)을 사용하였다.

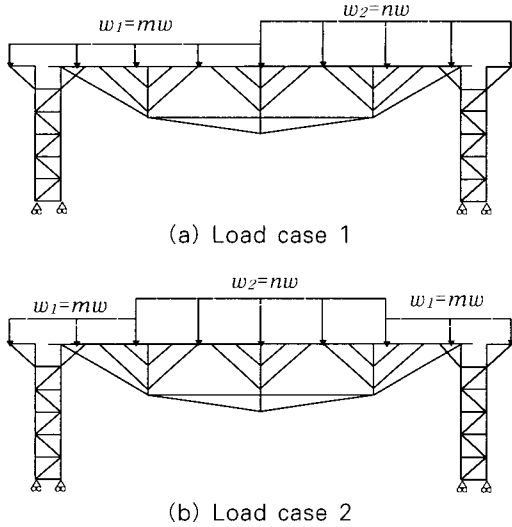


그림 25 Load case of non-uniform earth pressure

그림 26~27에서 편토압을 20%, 30% 증가시켜($n = 1.2, 1.3$) 구조해석을 수행했을 때 IPS 띠장의 내측연결부와 지점부에서 최대축력, 최대모멘트를 도시하였다.

편토압이 30% 작용한 Load case 1 경우 띠장의 축력은 중앙부에서는 27%, 우측지점부에서 22%의 큰 변화가 없었지만, 띠장의 모멘트는 중앙부는 24%, 지점부는 77% 크게 증가함을 알 수 있다.

Load case 2 경우 축력은 중앙부에서는 8%, 지점부에서 일정하였고, 모멘트의 경우는 중앙부에서 28%의 증가를 보였고 지점부는 18%의 감소를 보인다.

편토압이 작용함에 따라 Load case 1에서 편토압 계수가 30%인 경우 편토압이 크게 작용하는 우측 정착부가 좌측 정착부에 비하여 축변위는 29%, 횡변위는 48% 증가함을 알 수 있다.

편토압이 작용하는 Load case 1과 Load case 2에 대하여 식 (16)에서 구한 f_c/f_{ca} 을 종축에, $f_b/f_{ba}(1-f_c/f_e)$ 를 횡축에 도시한 합성응력도를 그림 16~17 및 표 10~11에 나타내었다. 모든 경우에 대하여 시방서에 규정된 설계식을 만족시킴을 확인하였다.

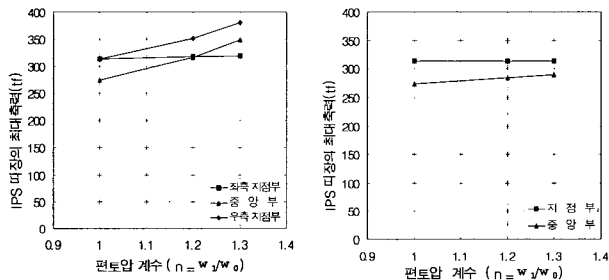


그림 26 Maximum axial force under non-uniform earth pressure

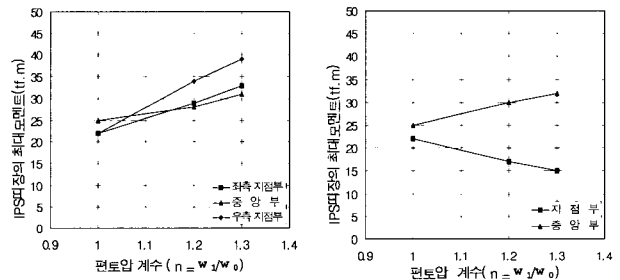


그림 27 Maximum moment under non-uniform earth pressure

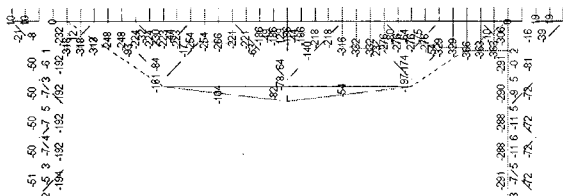


그림 28 Member forces of non-uniform earth pressure under load case 1 ($n=1.3$) [axial force(tf), moment(tf·m)]

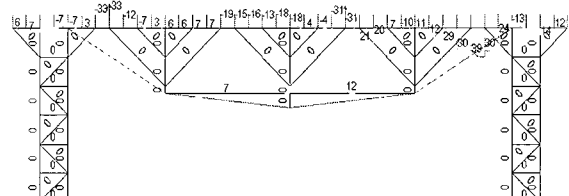


그림 29 Member forces of non-uniform earth pressure under load case 2 ($n=1.3$) [axial force(tf), moment(tf·m)]

표 9 Displacement of cable anchorage under non-uniform earth pressure(cm)

Load case	Parameter of non-uniform pressure	Left side		Right side	
		axial displacement	lateral displacement	axial displacement	lateral displacement
LC 1	n = 1	0.94	1.88	0.94	1.88
	n = 1.2	1.01	0.05	1.71	0.55
	n = 1.3	3.19	2.13	4.12	3.68
LC 2	n = 1	0.54	1.29	0.54	1.29
	n = 1.2	0.55	1.15	0.55	1.15
	n = 1.3	0.56	1.09	0.56	1.09

표 10 Combined stress check under load case 1

Load case	Parameter of non-uniform pressure	P (tf)	M (tf·m)	f_c (kgf/cm ²)	f_b (kgf/cm ²)	f_c/f_{ca}	$f_b/[f_{ba}(1-f_c/f_e)]$	K
LC 1	n = 1	313	22	899.9	478.3	0.338	0.180	0.518
	n = 1.2	351	34	1009.2	739.1	0.379	0.278	0.657
	n = 1.3	366	39	4052.3	847.8	0.396	0.319	0.715
LC 2	n = 1	274	25	787.8	543.5	0.296	0.204	0.500
	n = 1.2	316	28	908.6	608.7	0.342	0.229	0.570
	n = 1.3	332	31	954.6	673.9	0.359	0.253	0.612

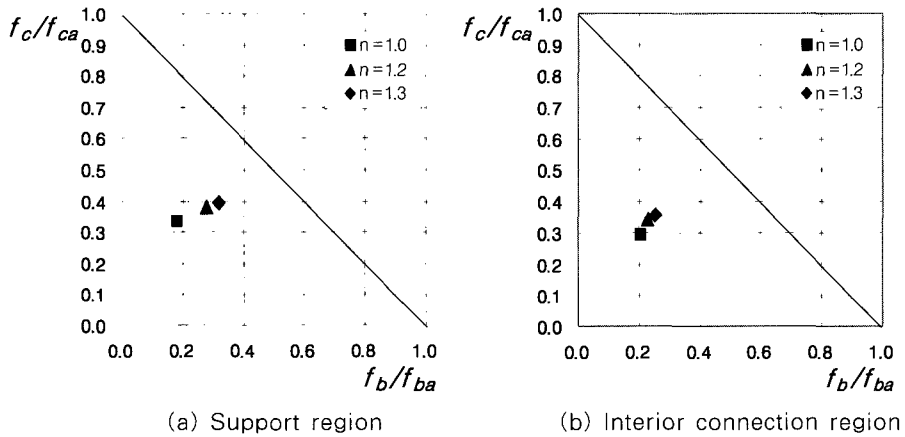


그림 30 Combined stress diagram of wale under load case 1

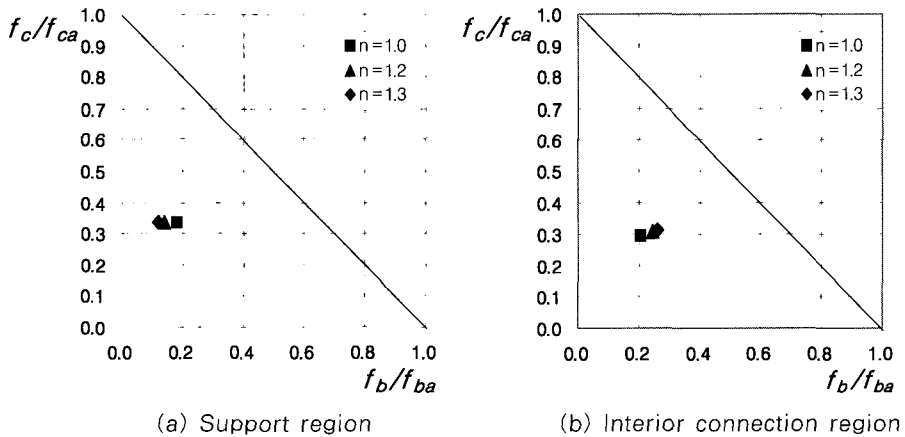


그림 31 Combined stress diagram of wale under load case 2

표 11 Combined stress check under load case 2

Load case	Parameter of non-uniform pressure	P (tf)	M (tf·m)	f_c (kgf/cm ²)	f_b (kgf/cm ²)	f_c/f_{ca}	$f_b/[f_{ba}(1-f_c/f_c)]$	K
LC 1	n = 1	313	22	899.9	478.3	0.338	0.180	0.518
	n = 1.2	313	17	899.9	369.6	0.338	0.139	0.477
	n = 1.3	313	15	899.9	326.1	0.338	0.122	0.461
LC 2	n = 1	274	25	787.8	543.5	0.296	0.204	0.500
	n = 1.2	285	30	819.4	652.2	0.308	0.245	0.553
	n = 1.3	290	32	833.8	695.7	0.313	0.261	0.573

편도압이 작용하는 경우 전체적으로 띠장 축응력은 거의 일정하고 휨응력만이 과도압이 작용하는 부분에서 증가함을 알 수 있다. 특히, 띠장의 좌·우측에 편도압이 작용하는 Load case 1의 경우 띠장의 휨응력이 상대적으로 크게 계산되어 n=1.3일때 지점부에서 휨응력이 균일도압이 작용하는 경우에 비하여 90%정도 증가하였다. 또한, 띠장 중앙부에 편도압이 작용하는 경우 편도압의 증가에 따라 축응력의 변화는 미비하고 휨응력은 22%증가하였으며 설계조건식을 모두 만족하였다.

5. 결 론

본 논문에서는, 프리스트레스트를 이용한 가시설 공법(IPS)에 적용되는 띠장의 거동 해석 및 설계절차에 대한 연구를 수행하였다. 띠장에 초기장력이 도입되는 구조계는 탄성지반위에 놓인 보이론에 의하여 부재력이 산출되고, 토압에 의한 부재력은 장력을 부정정력으로 취하여 부정정 구조해석을 통하여 띠장의 축력 및 휨모멘트를 계산하였다. 본 논문에서 유도된 식을 이용하여 케이블 장력을 계산한 결과(present-2)는 경사 브레이싱을 무시한 전산해석결과(MIDAS-2)와 최대 15%의 차이를 보이고, 띠장의 축력은 6.8%의 차이를 보인다. 기존의 가시설 설계에 적용되는 토압을 적용하여 IPS 띠장 설계를 실시하였고, 긴장력과 설계토압에 의한 축력과 휨모멘트를 계산하여 축응력과 휨응력을 도출하고 합성응력검토를 수행하였다. 설계된 띠장의 안전성 해석을 위하여 전산해석 모델을 작성하여 등분포 토압 및 편도압을 받는 띠장에 대하여 정밀 구조해석을 수행하였다. 전산해석결과 산정된 부재력으로부터 축응력과 휨응력을 도출하고 시방서에 제시된 설계조건식의 만족 여부를 검토하였다. 초기 강선의 긴장력만 재하되는 경우(0.7Pa)합성응력계수(k)가 0.704로 계산되었고, 시공

과정에서 발생가능한 과도압이 재하된 경우 (Pa, 1.3Wa) k=0.916으로 계산되어 허용범위 이내에 있음을 확인하였다. 또한, 편도압이 재하되는 경우 띠장의 휨응력이 상대적으로 크게 계산되어 n=1.3일때 지점부에서 휨응력이 균일도압이 작용하는 경우에 비하여 90%정도 증가하였으나 설계 허용범위를 넘지 않았다. 따라서 본 논문에서 제시된 설계기법에 의하여 IPS 띠장을 설계하면 충분한 안정성이 확보된다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-11630-0)지원으로 수행되었으며 재단의 지원에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 한만엽, 김문영, 김성보, 민병철, 이준석, "혁신적 프리스트레스트 가시설공법의 설계" 대한토목학회학술발표회논문집, 2003, pp.408~413
- 김훈겸, 한만엽, 김문영, 김성보, 한재영, "혁신적 프리스트레스트 가시설공법(IPS)에 적용되는 띠장의 거동" 대한토목학회학술발표회논문집, 2003, pp.1634~1688
- 한만엽, 김문영, 김성보, 박동현, "혁신적 프리스트레스트 IPS 띠장의 휨강성에 관한 이론적 연구" 대한토목학회학술발표회논문집, 2003, pp.3754~3759
- 한만엽, 김문영, 김성보, 민병철, 이영생 "혁신적 프리스트레스트 가시설 공법 연구 보고서," 아주대학교 토목기술연구센터, 2003, pp.1~307
- 김낙경, "사질토에 시공된 앵커토류벽의 토압분포에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제14권 5호, 1998. 10월, pp.17~28
- 김재관, 이해성, 정충기, 양태석, "탄소성 지반스프링모델을 사용한 지반굴착 해석에서의 해의 유일성", 대한토목학회논문집, 제16권 III-3호, 1996. pp.295~301

7. 박광순, 장학성, "흙막이 가설 구조물의 안정성 해석에 관한 연구", 롯데건설기술보, Vol. 25, No. 3, 1994. 7월, pp.12~20
8. 최인걸, 조현모, 류승철, "가시설 안정성 검토에 관한 인천국제공항 시공사례 연구", 한국지반공학회 학술발표회 논문집, 1999, pp.97~100
9. Boresi, A. P., Schmidt, R. J., "Advanced Mechanics of Materials", John wiley & sons inc., 2003
10. 김훈겸, "혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS)공법에 적용되는 띠장의 거동", 충북대학교 석사학위논문, 2004
11. Troitdky, M. S., "Prestressed Steel Bridges", Van Nostrand Reinhold, 1990, pp.78~104
12. MIDAS, "MIDAS GENw Getting Started & Tutorials", POSCO ENGINEERING & Construction Co., Ltd