

프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템의 모형 시험

A Model Test of Earth Retention System with Prestressed Wale

박 종 식¹ Park, Jong-Sik

김 낙 경² Kim, Nak-Kyung

김 성 규³ Kim, Sung-Kyu

주 용 선⁴ Joo, Yong-Sun

장 호 준⁵ Jang, Ho-June

Abstract

A model test was performed to evaluate the stability of a new earth retention system with a prestressed wale. For the model test, the dimensional analysis of a full-scaled earth retention system with prestressed wales was performed. Details of the dimensional analysis of the new earth retention system were presented in this paper. Based on the results of the dimensional analysis, the model-scaled earth retention system with a prestressed wale was simulated. The lateral earth pressures on the wall, the lateral deflection of the prestressed wale, the sectional force on members of the prestressed wale system, and the loads of struts were measured during construction simulation. The measured results were evaluated and compared with those of the design criterion. From the measurements, the behavior of this earth retention system was investigated.

요 지

프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템의 안정성을 평가하고 거동 특성을 규명하기 위하여 모형 시험이 수행되었다. 본 흠막이 시스템의 모형 시험을 위해 현장 규모의 프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템에 대한 차원 해석이 수행되었다. 본 논문에는 새로운 흠막이 시스템에 대한 차원 해석의 절차 및 방법이 제시되어 있다. 차원 해석 결과로부터 모형 규모의 프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템을 구현하였다. 모형 시험 중 새로운 흠막이 시스템 부재에 대한 계측을 수행하여 흠막이 벽체 배면의 토압 거동, 프리스트레스트 띠장의 변형 거동, 띠장 시스템 부재의 힘 거동과 버팀보의 힘 거동을 파악하였다. 모형 시험 결과는 프리스트레스트 띠장 시스템 부재의 설계 결과와 비교 평가되었다.

Keywords : Dimensional analysis, Earth retention system, Model test, Prestressed wale

1. 서 론

최근 들어 굴착 규모가 큰 택지 공사, 도심지 내의 빌딩 건축 및 지하철 역사 시공을 위한 굴착 공사 그리

고 연약 지반에서의 흠막이 굴착 공사에 버팀보나 앵커 지지 시스템의 대안으로서 프리스트레스트 띠장을 적용한 새로운 흠막이 시스템이 적용되고 있다(한만엽 등 2003a, Kim et al. 2004). 본 흠막이에 적용된 프리스

1 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotech. Engrg. Research Dept. Korea Institute of Construction Technology)

2 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수 (Member, Assoc. Prof., Dept. of Civil, Architectural and Envir. System Engrg., Sungkyunkwan Univ., nkkim@skku.edu, 교신저자)

3 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Architect. Envir. System Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

4 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Architect. Envir. System Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

5 대우건설 사원 (Staff, Daewoo Engineering & Construction Company)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

트레스트 띠장은 강선의 긴장력을 활용한 새로운 개념의 혁신적인 띠장 시스템이다. 새로운 프리스트레스트 띠장 시스템은 강선, 띠장, 받침대 및 유압잭으로 구성되어 있다. 본 프리스트레스트 띠장 시스템은 휨강성이 매우 크기 때문에 벽체를 지지하는 버팀보의 설치 간격을 기존 버팀보나 앵커 시스템의 지보재 설치 간격에 비해 십여 배 이상 증가시킬 수 있으며 굴착 토압으로 인해 발생된 휨에 안정적으로 저항하면서 토압을 버팀보에 전달한다. 그리고 지반 굴착으로 인한 벽체의 변형을 억제한다. 프리스트레스트 띠장을 적용한 새로운 흠막이 시스템은 보다 넓은 작업 공간을 제공하고 강재 사용량을 줄여 공사비를 절감할 수 있다. 또한 상하수도, 전력선 및 통신선이 많이 매설되어 있는 도심지에서의 굴착 공사에서 지반 천공이 요구되는 앵커 시스템에 비해 지중물의 손상없이 굴착 공사를 수행할 수 있다.

프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 프리스트레스트 띠장 시스템의 휨강성 증가와 관련된 프리스트레스트 기술이 연구되었다(Troitsky 1990). 이를 바탕으로 프리스트레스트 띠장을 적용한 새로운 흠막이 시스템의 기본 원리와 설계법이 연구되었다(한만엽 등 2003b, 박종식 등 2003a,b, 2004, Kim et al. 2004). 새로운 프리스트레스트 띠장 시스템의 안정성 평가를 위하여 수치 해석 연구가 수행되었다(김문영 등 2005, 김성보 등 2005a,b, 이준석 등 2006). 느슨한 모래, 다층토 및 연약 지반에 적용된 새로운 흠막이 시스템의 현장 적용성 및 안정성 평가를 위한 연구가 수행되었다(김낙경 등 2005, Kim et al. 2004, 2005).

프리스트레스트 띠장을 적용한 새로운 흠막이 시스템의 안정성을 평가하고 거동 특성을 규명하기 위하여 모형 시험이 수행되었다. 모형 시험을 위하여 현장 규모의 프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템에 대한 차원 해석이 수행되었다. 본 논문에는 새로운 흠막이 시스템에 대한 차원 해석의 절차 및 방법이 제시되었다. 차원 해석 결과로부터 모형 규모의 프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템을 구현하였다. 모형 시험 중 흠막이 시스템 부재에 대한 계측을 수행하여 흠막이 벽체 배면의 토압 거동, 프리스트레스트 띠장의 변형 거동, 띠장 시스템 부재의 힘 거동과 버팀보의 힘 거동을 알아보았다. 모형 시험 결과는 프리스트레스트 띠장 시스템 부재의 설계 결과와 비교 평가되었다.

2. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템의 차원 해석

2.1 차원 해석과 Buckingham Π 이론

차원 해석은 어떠한 현상이 그 현상에 관련된 변수들의 차원이 고려된 방정식으로 표현될 수 있다는 전제로부터 시작되며 변수들을 논리적인 관계 즉 무차원 관계로 맺게 하는 이론이다. 차원 해석을 통하여 현상과 관련된 변수들을 줄일 수 있으며 많은 실험을 감소할 수 있다.

Buckingham Π 이론(Buckingham 1915)은 현상에 관련된 변수들의 상관관계를 규명하는 데 요구되는 독립 변수들의 무차원 집단의 수는 $n-m$ 과 같다는 결론을 담고 있으며 여러 연구자들(Bridgman 1922, Bocher 1938, Van Driest 1946)에 의해서 관련 연구에 적용되어 왔다. 여기서 n 은 변수의 수이고 m 은 변수에 포함되어 있는 기본 차원의 수이다. 식 (1)의 n 개의 변수를 갖는 함수 $f(x)$ 를 Buckingham Π 이론을 통하여 식 (2)의 $n-m$ 개의 무차원 매개변수의 함수인 $g(\pi)$ 로 나타낼 수 있다.

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

$$g(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (2)$$

현상에 관련된 변수들이 무차원 관계를 맺으므로써 그 현상에 대한 모형(model)과 실대형(prototype)은 완전한 상사를 이루었다고 가정되며(Langhaar 1951) 식 (3)과 같이 차원 해석을 통하여 얻어낸 무차원 매개변수들 중 그 현상을 대표할 수 있는 무차원 변수를 선정하여 활용함으로써 모형 설계를 수행할 수 있게 된다.

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_p) \quad (3)$$

2.2 무차원 매개변수 유도

차원 해석을 통하여 무차원 매개변수를 획득하는 방법에는 지배 방정식을 적용하는 방법이 있다. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흠막이 시스템의 차원 해석에서는 프리스트레스트 띠장의 거동이 수평 방향 말뚝의 거동과 유사하다는 점에 착안하여 수평 방향 말뚝의 지배 방정식을 적용하여 무차원 매개변수들을 유도하였으며 주요 무차원 변수를 선정하여 이를 모형 설계에 적용하였다.

탄성 기초의 보이론을 근거한 수평 방향 말뚝의 지배 방정식은 식 (4)와 같다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0 \quad (4)$$

여기서 EI 는 말뚝의 휨강성, k 는 지반반력계수, y 는 말뚝의 길이, x 는 말뚝의 수평 방향 변위.

식 (4)로부터 무차원 매개변수를 얻는 과정은 다음과 같다. 먼저 두 개의 무차원 변수 π_1, π_2 를 식 (5)와 같이 구성한다.

$$\pi_1 = \frac{y}{D}, \pi_2 = \frac{x}{L} \quad (5)$$

여기서 y 는 말뚝의 길이 방향 좌표, x 는 수평 변위, D 는 말뚝의 직경, L 은 말뚝의 길이.

식 (5)를 식 (4)에 대입하면 식 (6)과 같다. 식 (6)은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$EI \frac{d^4 (\pi_1 D)}{d(\pi_2 L)^4} + k \pi_1 D = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^4 \pi_1}{d\pi_2^4} + \frac{kL^4}{EI} \pi_1 = 0 \quad (7)$$

식 (7)로부터 무차원 변수 π_3 는 식 (8)과 같다.

$$\pi_3 = \frac{kL^4}{EI} \quad (8)$$

한편 또다른 무차원 변수를 얻기 위하여 수평 방향 말뚝의 경계 조건이 적용되었으며 식 (9)와 같다. 여기서 V 는 전단력, P 는 외부 작용 하중.

$$y = 0, V = EI \frac{d^3 y}{dx^3} = P \quad (9)$$

식 (9)는 식 (10)-(12)와 같이 표현된다.

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} = EI \frac{d^3 (\pi_1 D)}{d(\pi_2 L)^3} = P \quad (10)$$

$$EI \frac{D \cdot d^3 \pi_1}{L^3 \cdot d\pi_2^3} = P \quad (11)$$

$$\frac{d^3 \pi_1}{d\pi_2^3} = \frac{PL^3}{EI \cdot D} = \pi_4 \quad (12)$$

수평 방향 말뚝의 지배 방정식을 통하여 얻어낸 무차원 변수들을 정리하면 아래와 같다.

$$\pi_1 = \frac{y}{D}, \pi_2 = \frac{x}{L}, \pi_3 = \frac{kL^4}{EI}, \pi_4 = \frac{PL^3}{EI \cdot D}$$

3. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템의 모형 설계

프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템의 모형 설계를 수행하기 위하여 차원 해석으로부터 도출된 무차원 매개변수들 중 π_3 를 선정하였다. 무차원 변수 π_3 는 지반반력계수 k , 띠장의 길이 L 그리고 띠장의 휨강성 EI 로 구성되었으며 본 무차원 변수를 활용하여 새로운 프리스트레스트 띠장의 거동을 규명하는 것이 타당하다고 판단되었다.

3.1 모형과 실대형의 축소비

모형과 원형 간의 완전한 상사 성립을 위한 무차원 계수값은 동일해야 하며 식 (13)과 같다.

$$\pi_3 = \left[\frac{kL^4}{EI} \right]_p = \left[\frac{kL^4}{EI} \right]_m \quad (13)$$

여기서 $k = K \cdot z$ (K 는 지반반력계수, z 는 지반 깊이)라 하면 식 (13)은 식 (14)-(15)로 표현된다.

$$\pi_3 = \left[\frac{K \cdot z \cdot L^4}{EI} \right]_p = \left[\frac{K \cdot z \cdot L^4}{EI} \right]_m \quad (14)$$

$$\frac{EI_m}{EI_p} = \frac{K_m}{K_p} \times \frac{z_m}{z_p} \times \left[\frac{L_m}{L_p} \right]^4 \quad (15)$$

여기서 K_p, z_p, L_p 의 실대형 조건은 Kim et al.(2005) 참조. 그러므로 $K_m/K_p = 2, z_m/z_p = 30/150$ 그리고 $L_m/L_p = 1/40$. 그러므로 모형과 실대형 간의 휨강성 축소비는 식 (16)과 같다.

$$\frac{EI_m}{EI_p} = \frac{1}{2} \times \frac{30}{150} \times \left[\frac{1}{40} \right]^4 = 1.6 \times 10^{-7} \quad (16)$$

3.2 모형 벽체의 단면

모형 벽체의 단면은 식 (16)으로부터 산정된 휨강성

축소비를 적용하여 결정되며 식 (17)과 같다.

$$I_m = \left[\frac{EI_m}{EI_p} \right] \times \frac{EI_p}{E_m} \quad (17)$$

실대형 벽체의 휨강성은 $7.0 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 이며(Kim et al. 2005) 모형 벽체의 탄성계수는 $3.1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ 이다. 그러므로 모형 벽체의 두께는 식 (18)로부터 산정된다.

$$I_{m(wall)} = \left[\frac{EI_m}{EI_p} \right] \times \left[\frac{EI_p}{E_m} \right] = \frac{1 \times t^3}{12} \quad (18)$$

모형 벽체의 두께는 3.5mm이다.

3.3 모형 프리스트레스트 띠장 시스템의 단면

프리스트레스트 띠장 시스템을 구성하고 있는 띠장, 받침대와 강선의 단면이 결정된다. 또한 버팀보의 단면이 결정된다. 모형 띠장의 소요 단면은 식 (16)의 휨강성 축소비를 적용하여 산정된다. 실대형 띠장의 휨강성은 $1.9 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 이며(Kim et al. 2005) 모형 띠장의 탄성계수는 $3.1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ 이다. 모형 띠장의 소요 단면2차모멘트 $9,833 \text{ mm}^4$ 이며 이로부터 폭 20mm, 높이 15mm의 모형 띠장의 단면이 결정되었다.

모형 받침대의 소요 단면은 식 (16)의 휨강성 축소비를 적용하여 산정된다. 실대형 받침대의 단면2차모멘트는 $2.04 \times 10^4 \text{ m}^4$ 이며(Kim et al. 2005) 모형 받침대의 탄성계수는 $3.1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ 이다. 모형 받침대의 소요 단면2차모멘트는 $2,118 \text{ mm}^4$ 이며 이로부터 폭 8mm, 높이 15mm

의 모형 받침대의 단면이 결정되었다.

모형 강선의 단면을 결정하기 위하여 프리스트레스트 띠장 시스템의 휨강성 계수가 고려된다(한만엽 등 2003b). 프리스트레스트 띠장 시스템의 휨강성 계수 축소비는 식 (19)로부터 산정된다.

$$\left[\frac{K_{IPS_m}}{K_{IPS_p}} \right] = \left[\frac{L_p}{L_m} \right]^4 \times \frac{EI_m}{EI_p} \quad (19)$$

여기서 K_{IPS} 는 프리스트레스트 띠장 시스템의 휨강성 계수(한만엽 등 2003b), EI 는 띠장의 휨강성, L 은 띠장 길이. 실대형 프리스트레스트 띠장 시스템의 휨강성 계수는 908.5 kN/m^2 이다(Kim et al. 2005). 모형 프리스트레스트 띠장 시스템의 휨강성 계수는 식 (19)로부터 산정되며 370.4 kN/m^2 이다. 프리스트레스트 띠장의 휨강성 계수는 띠장 길이, 강선 길이, 받침대 길이 그리고 강선의 단면적으로 정의된다(한만엽 등 2003b). 이들을 고려하여 직경 0.6mm의 강선 단면이 결정되었다.

모형 버팀보의 소요 단면은 식 (16)을 이용하여 산정된다. 실대형 버팀보의 단면2차모멘트는 $6.12 \times 10^4 \text{ m}^4$ 이

표 1. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템의 모형 설계 결과

부재	물성	단면(mm)
벽체	휨강성 = $7.35 \times 10^{-1} \text{ kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$	$W1000 \times L1000 \times B3.5$
띠장	휨강성 = $2.06 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$	$W15 \times L1000 \times H20$
받침대	단면적 = $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$W8 \times L185 \times H15$
버팀보	단면적 = $3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$W24 \times L350 \times H15$
강선	단면적 = $2.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$	$\phi 0.6$

참조: W = 폭, L = 길이, H = 높이, t = 두께, 그리고 ϕ = 직경.

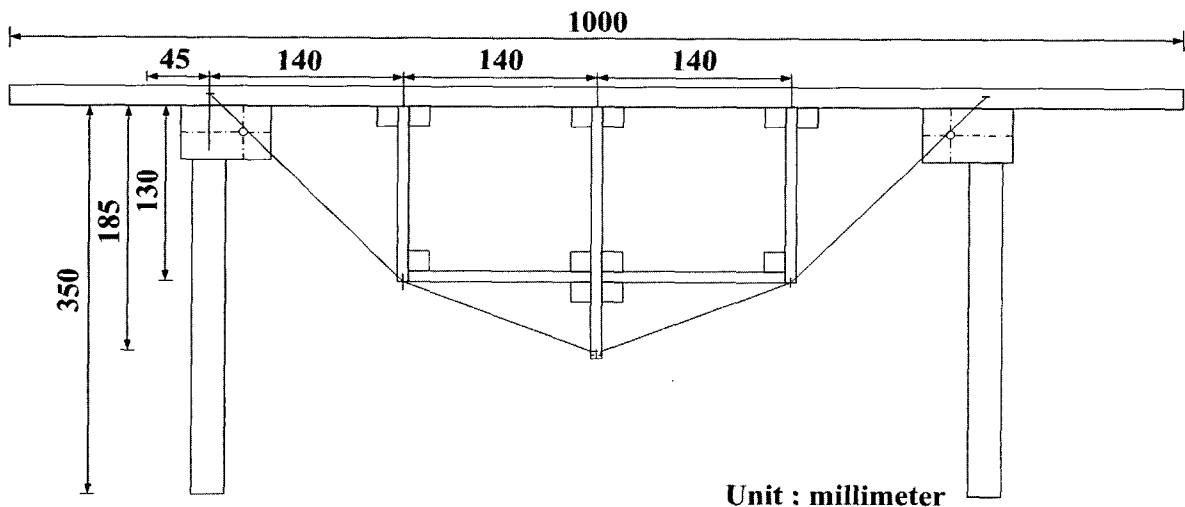


그림 1. 프리스트레스트 띠장 시스템 모형의 평면도

며(Kim et al. 2005) 모형 버팀보의 탄성계수는 3.1×10^6 kN/m^2 이다. 모형 버팀보의 단면은 폭 24mm, 높이 15mm로 결정되었다. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템의 모형 설계 결과가 표 1에 제시되어 있으며 모형의 평면도가 그림 1과 같다.

4. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템의 모형 시험

4.1 모형 흙막이 시스템 구현

프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템의 모형 시험을 수행하기 위하여 가로 1.8m, 세로 1.8m, 높이 1.5m의 토조가 사용되었다. 벽체와 프리스트레스트 띠장 시스템 모형은 아크릴 재료로 제작되었으며 띠장 시스템의 강선은 피아노선으로 대체하였다.

모형 벽체는 1 단의 프리스트레스트 띠장 시스템과

버팀보로 지지되었으며 모형 지반의 굴착 깊이는 0.6m이며 모형 벽체의 근입 깊이는 0.4m이다. 벽체 배면 지반의 규모는 폭 1.0m, 길이 1.8m, 높이 1.0m이다. 토조 벽면과 모형 벽체 간의 마찰을 줄이기 위하여 폴리프로필렌이 적용되었다.

토조의 강사 장치를 활용하여 모형 지반을 조성하였다. 지반 조성을 위하여 표준사를 사용하였으며 강사된 지반의 상대 밀도는 60-65%, 내부 마찰각은 약 37° 이다. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템 모형의 평면도와 단면도가 그림 2와 같다.

4.2 계측 계획

프리스트레스트 띠장을 적용한 새로운 흙막이 시스템의 거동을 파악하기 위하여 벽체 배면의 토압, 프리스트레스트 띠장 시스템 부재의 하중, 띠장의 휨변위 그리고 버팀보 하중이 계측되었다. 벽체 배면의 토압을 측정

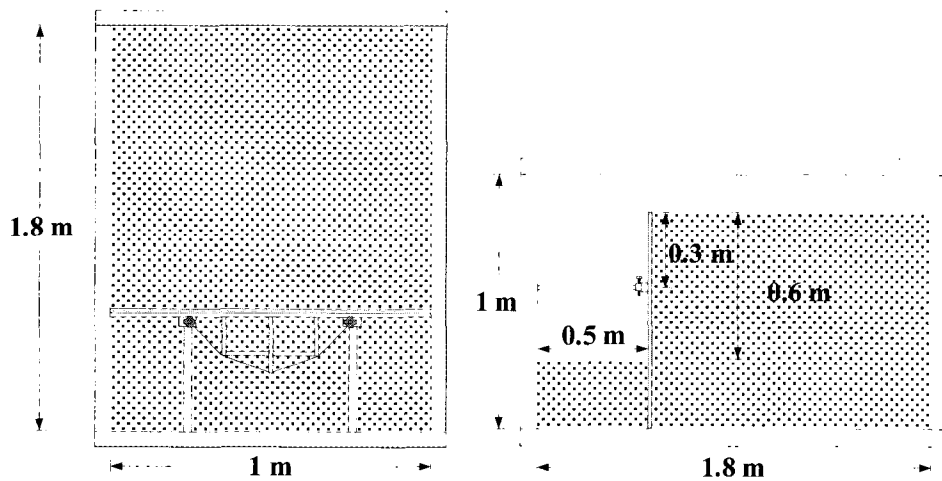


그림 2. 프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템 모형의 개요도

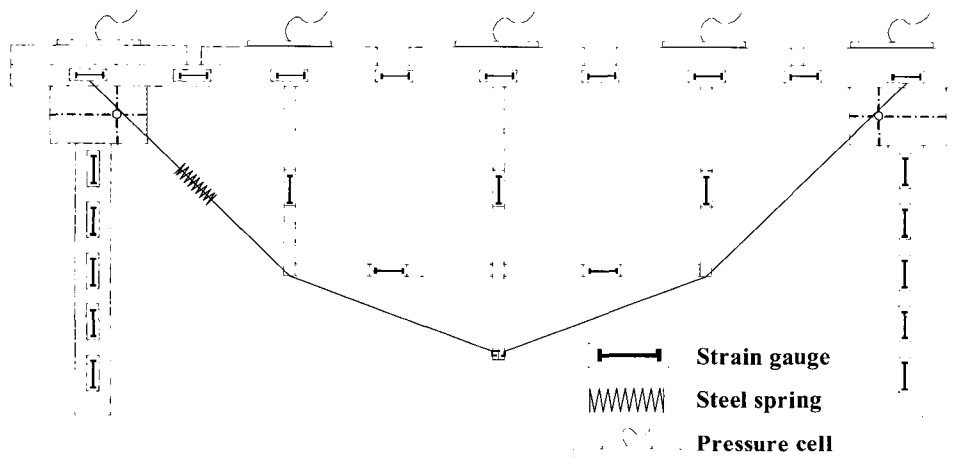


그림 3. 계측기 설치 위치

하기 위하여 5 개의 토압계가 설치되었다. 띠장의 축력과 휨모멘트를 측정하기 위하여 13 개의 변형률 게이지가 설치되었다. 띠장의 휨변위를 측정하기 위하여 버니어캘리퍼스가 사용되었다. 받침대의 하중을 측정하기 위하여 5 개의 변형률 게이지가 설치되었다. 버팀보의 하중을 측정하기 위하여 20 개의 변형률 게이지가 설치되었다. 그림 3은 계측기 설치 위치를 나타내고 있다.

4.3 모형 시험 순서

프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이 시스템의 모형 시험 절차는 다음과 같다(그림 4 참조).

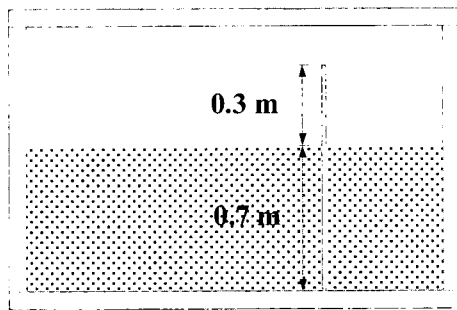
- 벽체 설치 후 토조 바닥면으로부터 0.7m 높이까지 표준사 강사

- 토조 바닥면으로부터 0.7m 지점에 프리스트레스트 띠장 시스템과 버팀보 설치
- 최종 높이인 1.0m까지 표준사 강사
- 벽체 배면 토압과 흙막이 시스템 부재의 초기 하중 계측
- 모형 지반 표면으로부터 0.3m 굴착 후 계측
- 강선의 설계 긴장력의 70%를 띠장 시스템에 도입 후 계측
- 모형 지반 표면으로부터 0.6m 최종 굴착 후 계측
- 모형 지반 우측 상부에 3.0kPa의 편하중 재하 후 계측
- 강선의 설계 긴장력의 120%를 띠장 시스템에 도입 후 계측

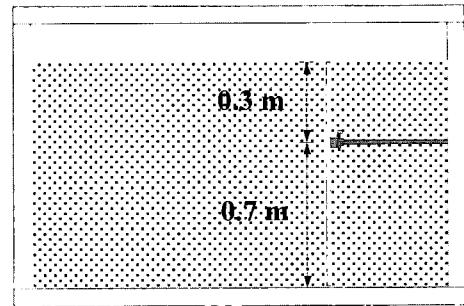
4.4 모형 시험 결과

4.4.1 띠장 휨변위

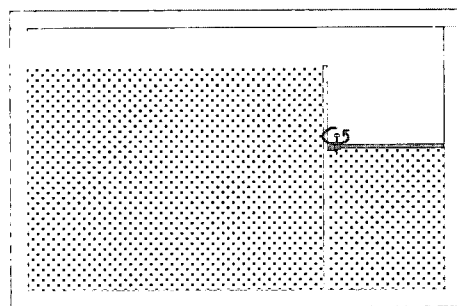
모형 시험 절차에 따라 주요 단계별로 계측된 띠장의



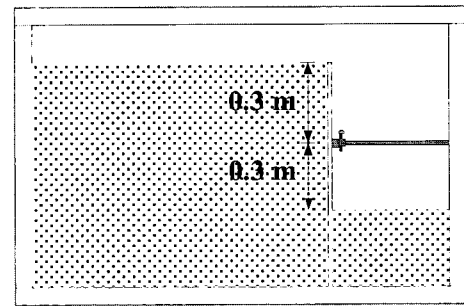
1 단계 : 벽체 설치 후 표준사 강사



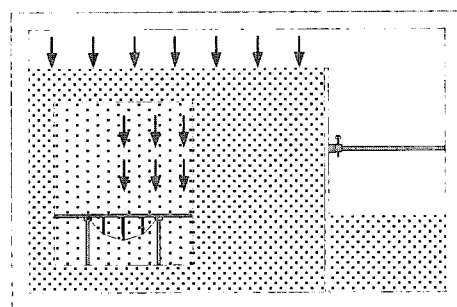
2 단계 : 프리스트레스트 띠장 시스템과 버팀보 설치



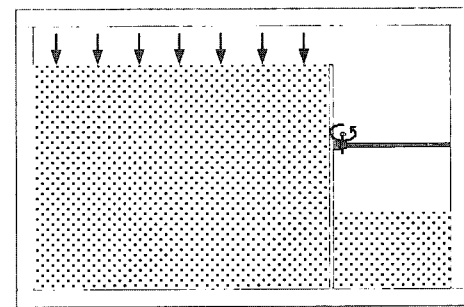
3 단계 : 0.3m 지반 굴착 후 강선 설계 긴장력의 70% 도입



4 단계 : 0.6m 최종 굴착



5 단계 : 편하중 재하



6 단계 : 강선 재긴장 하중 재하

그림 4. 모형 시험 절차

휨변위 결과는 그림 5와 같다. 주요 단계별로 파악된 띠장의 휨변위 거동을 보면 모형 지반의 첫 굴착 이후 강선의 긴장력 도입으로 인하여 띠장이 벽체 배면으로 밀려들어갔으며 띠장은 중앙부에서 최대 휨변위를 나타내는 배부를 거동 패턴을 나타냈다. 시험 결과로부터 벽체에 대한 새로운 프리스트레스트 띠장 시스템의 선행 하중 효과를 확인할 수 있었다. 반면에 버팀보가 위치한 띠장에서는 변형이 거의 발생되지 않았다. 이는 버팀보의 축강성에 의한 영향으로 판단된다. 주요 단계별로 계측된 띠장의 휨변위는 프리스트레스트 띠장 시스템의 휨강성 계수 KIPS(한만엽 등 2003b)와 설계 토압(Terzaghi & Peck 1967)의 관계로부터 도출된 설계 변위인 2.0mm 내에서 측정되었다.

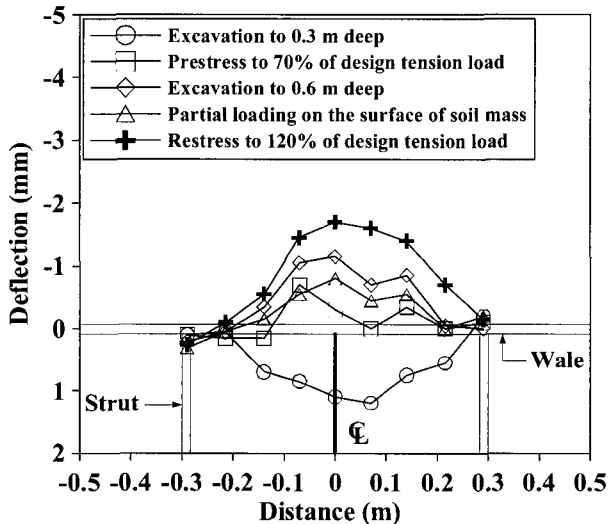


그림 5. 띠장 휨변위

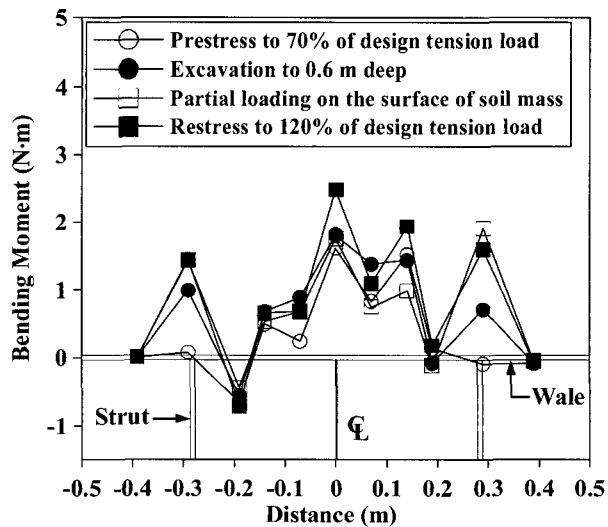


그림 6. 띠장 휨모멘트

4.4.2 띠장 휨모멘트

주요 단계별로 측정된 띠장의 휨모멘트 결과는 그림 6과 같다. 띠장의 휨모멘트 결과를 보면 중앙 받침대가 위치한 띠장 부분에서 최대 휨모멘트가 발생되었음을 알 수 있다. 또한 받침대와 버팀보가 위치한 띠장에서 휨모멘트가 크게 발생되었다. 띠장 시스템에 강선의 긴장력이 도입됨으로써 띠장의 휨모멘트가 증가되었다. 계측을 통하여 새로운 프리스트레스트 띠장의 휨모멘트 거동이 규명되었다. 계측된 띠장의 휨모멘트 결과는 프리스트레스트 띠장의 설계 휨모멘트(Park 2006) 내에 있음을 알 수 있었다.

4.4.3 벽체 배면 토압

새로운 프리스트레스트 띠장 시스템이 적용된 흙막이 벽체 배면의 토압 분포는 그림 7과 같다. 계측된 벽체 배면의 토압 거동을 보면 토압 분포가 불균등하였으며 중앙 받침대 위치에서의 벽체의 배면에서 최대 토압이 발생되었다. 받침대 위치에서의 벽체 배면 토압이 버팀보 위치에서의 토압보다 더 크게 측정되었다. 편하중 및 재긴장 하중이 도입되는 단계에서 벽체 배면의 토압이 증가되는 경향을 나타냈다. 계측 결과를 통하여 프리스트레스트 띠장이 적용된 흙막이 벽체 배면의 토압 거동이 프리스트레스트 띠장의 변형 거동과 밀접한 관계를 맺고 있음을 알 수 있었으며 새로운 띠장 시스템이 적용된 흙막이 벽체 배면의 토압 거동이 규명되었다. 한편 토압계로부터 계측된 하중을 Terzaghi & Peck(1967)과 Goldberg et al.(1976)의 설계토압 하중과 비교 평가하였다. 계측된 하중은 설계토압 하중에 비해 각각 14.8%

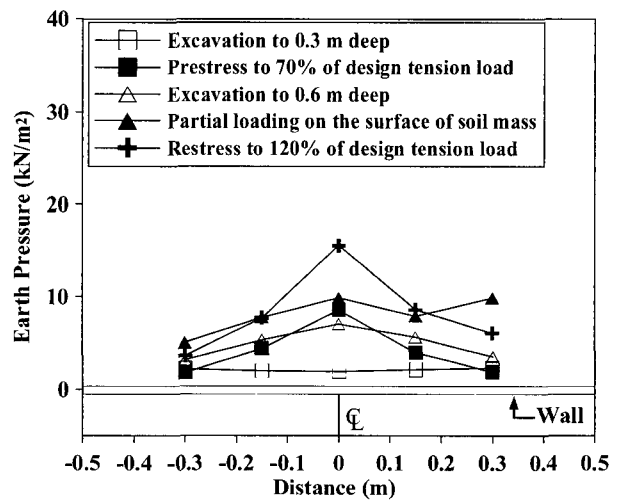


그림 7. 벽체 배면 토압

와 19.1% 더 크게 측정되었다.

4.4.4 띠장 축력

주요 단계별로 측정된 프리스트레스트 띠장의 축력 결과가 그림 8에 제시되었다. 강선 설계 긴장력의 70% 도입시, 150-171N이 띠장에서 계측되었다. 0.6m 모형 지반 굴착시, 148-165N의 축력이 띠장에서 측정되었다. 모형 지반에의 편하중 재하시, 166-185N의 축력이 띠장에서 계측되었으며 강선 재긴장시, 244-295N의 하중이 띠장에서 측정되었다. 띠장의 축력 거동을 보면 초기 강선 긴장력 도입 후 지반 굴착, 편하중 및 재긴장 하중 도입으로 인해 띠장 축력이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 다양한 하중 조건에 대한 강선의 신장과 이로 인한 유발된 강선 하중이 띠장에 안정적으로 전달되고 있음을 나타내고 있다. 또한 새로운 프리스트레스트 띠장의 축력 거동이 규명되었다. 띠장에서 계측된 축력 결과는 띠장 설계 하중의 73-145%로 평가되었다.

4.4.5 받침대 축력

프리스트레스트 띠장 시스템의 받침대 축력 결과가 그림 9와 같다. 강선 설계 긴장력의 70% 도입시, 받침대에서 계측된 하중은 125-160N이었다. 0.6m 모형 지반 굴착시, 116-151N이 받침대에서 측정되었다. 모형 지반에 편하중 재하시, 117-161N의 축력이 계측되었으며 강선 재긴장시, 192-266N의 하중이 측정되었다. 계측된 받침대의 축력 거동을 보면 새로운 띠장 시스템의 받침

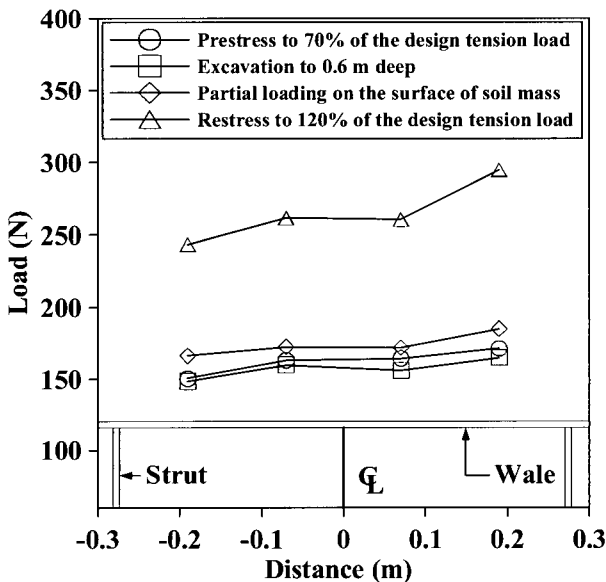
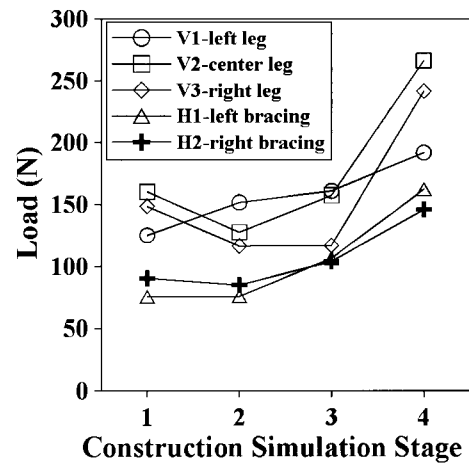


그림 8. 띠장 축력

대 설계에서는 설계 토압에 대한 받침대 축력이 동일하다는 가정(Kim et al. 2004)이 적용되나 시험 결과를 보면 받침대 계측 축력이 12-18% 편차를 나타냈다. 이는 벽체 배면의 토압 분포가 불균등하기 때문으로 판단된다. 이로부터 새로운 프리스트레스트 띠장 시스템의 받침대 축력 거동이 규명되었다. 받침대에서 측정된 축력은 Terzaghi & Peck(1967) 설계 하중의 85-118%로 평가되었다.

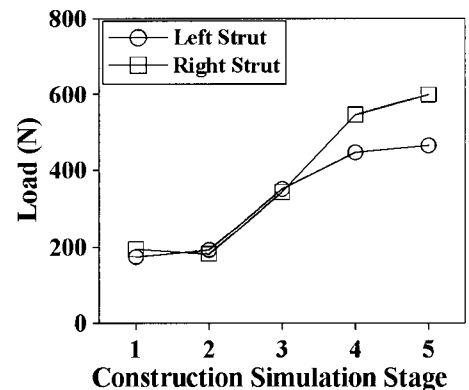
4.4.6 버팀보 축력

주요 단계별로 측정된 버팀보의 축력 결과는 그림 10과 같다. 0.3m 모형 지반 굴착시, 175-195N의 하중이 버



1 - Prestress to 70% of design tension load
2 - Excavation to 0.6 m deep
3 - Partial loading on the surface of soil mass
4 - Restress to 120% of design tension load

그림 9. 받침대 축력



1 - Excavation to 0.3 m deep
2 - Prestress to 70% of design tension load
3 - Excavation to 0.6 m deep
4 - Partial loading on the surface of soil mass
5 - Restressing to 120% of design tension load

그림 10. 버팀보 축력

탐보에서 측정되었다. 강선 설계 긴장력의 70% 도입시, 182-193N의 하중이 계측되었다. 0.6m 모형 지반 굴착시, 343-351N의 축력이 버팀보에서 측정되었다. 모형 지반에 편하중 재하시, 447-546N의 하중이 계측되었으며 강선 재긴장시, 465-599N의 하중이 측정되었다. 측정된 버팀보 축력 거동을 보면 첫 굴착 이후 강선 긴장과 최종 굴착에 따른 양쪽 버팀보의 거동은 유사하게 나타났으나 편하중과 강선 재긴장 하중 도입 후 오른쪽 버팀보의 축력이 증가하는 경향을 나타냈다. 위 계측 거동을 통하여 새로운 프리스트레스트 띠장 시스템이 다양한 하중 조건으로 인한 토압 변동과 이로 인한 휨에 저항하면서 토압을 안정적으로 버팀보에 전달했음을 알 수 있었다. 버팀보에서 계측된 축력 결과는 설계 토압에 근거한 버팀보 설계 하중과 5.8% 편차를 나타냈다.

5. 결론

프리스트레스트 띠장을 적용한 새로운 흙막이 시스템의 안정성을 평가하고 거동을 규명하기 위하여 모형 시험이 수행되었다. 새로운 흙막이 시스템 모형에 대한 계측을 수행하여 흙막이 벽체 배면의 토압 거동, 프리스트레스트 띠장의 변형 거동, 띠장 시스템 부재의 휨 거동과 버팀보의 휨 거동을 알아보았다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 프리스트레스트 띠장 시스템의 차원 해석에 관한 절차와 방법이 제시되었다. 프리스트레스트 띠장 시스템에 대한 차원 해석을 통하여 지반반력계수, 띠장 길이와 휨강성으로 구성된 무차원 매개변수를 획득할 수 있었으며 이를 적용하여 모형 시험 수행을 위한 새로운 프리스트레스트 띠장 시스템의 단면을 설계할 수 있었다.
- (2) 다양한 하중 조건에 따른 프리스트레스트 띠장의 변형 거동과 벽체 배면의 토압 거동이 규명되었다. 띠장의 변형 거동을 통하여 굴착 벽체에 대한 새로운 띠장 시스템의 선행 하중 효과를 확인할 수 있었다. 프리스트레스트 띠장이 적용된 흙막이 벽체 배면의 토압 거동은 불균등 분포 특성을 보였으며 주요 단계별로 계측된 프리스트레스트 띠장의 변형 거동과 밀접하게 연계됨을 알 수 있었다.
- (3) 프리스트레스트 띠장 시스템 부재인 띠장의 휨모멘트와 축력 거동 그리고 받침대 축력 거동이 규명되

었다. 다양한 하중 변화에 대한 띠장과 받침대의 거동은 안정적이었으며 이들 부재의 계측 결과를 통하여 새로운 띠장 시스템의 기본 미케니즘과 설계 방법(Kim et al. 2004)이 검증되었다.

- (4) 프리스트레스트 띠장을 적용한 흙막이의 버팀보 거동이 규명되었다. 버팀보의 계측 거동을 통하여 새로운 프리스트레스트 띠장 시스템이 다양한 하중 조건으로 인한 토압 변동과 이로 인한 휨에 저항하면서 토압을 안정적으로 버팀보에 전달했음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-11630-0)지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김낙경, 박종식, 장호준 (2005), 도심지 굴착에 적용된 IPS 띠장의 안정성, *한국구조물진단학회 논문집*, 제9권, 제2호, pp.225-236.
2. 김문영, 이준석, 한만엽, 김성보, 김낙경 (2005), 슬라이딩을 허용하는 다절점 케이블소, *한국강구조학회 논문집*, 제17권, 제4호, pp.449-457.
3. 김성보, 한만엽, 김문영, 김낙경, 지태석 (2005a), 혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS) 공법에 적용되는 띠장의 설계 및 해석, *한국전산구조공학회 논문집*, 제18권, 제1호, pp.79-91.
4. 김성보, 한만엽, 김문영, 김낙경, 한진희 (2005b), 혁신적 프리스트레스트 가시설 구조시스템(IPS)에 적용되는 중간 버팀보의 해석 및 설계, *한국강구조학회 논문집*, 제17권, 제5호, pp.627-636.
5. 박종식, 김중우, 김낙경, 이영생, 한만엽 (2003a), IPS 흙막이 공법 I - 기본원리, 2003년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.3775-3779.
6. 박종식, 김중우, 김낙경, 이영생, 한만엽 (2003b), IPS 흙막이 공법 II - 시공사례, 2003년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.3748-3753.
7. 박종식, 김낙경, 한만엽, 김중우 (2004), IPS(Innovative Prestressed Wale System) 흙막이 공법의 개발, *한국지반공학회 2004 봄학술 발표회 논문집*, pp.293-300.
8. 이준석, 김문영, 한만엽, 김성보, 김낙경 (2006), 다절점 케이블소를 이용한 외부 긴장된 강구조 시스템의 기하학적 비선형해석, *한국강구조학회 논문집*, 제18권, 제6호, pp.727-735.
9. 한만엽, 김문영, 김성보, 민병철, 이준석 (2003a), 혁신적 프리스트레스트 가시설공법의 설계, 2003년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.408-413.
10. 한만엽, 김문영, 김성보, 박동현 (2003b), 혁신적 프리스트레스트 IPS 띠장의 휨강성에 관한 이론적 연구, 2003년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.3754-3759.
11. Bridgman, P. W. (1922), *Dimensional analysis*, Yale University Press.
12. Bocher, M. (1938), *Introduction to higher algebra*, Macmillan, New York.

13. Buckingham, E. (1915), "Model experiments and the forms of empirical equations", *Proc. No. 1487*, ASME, Spring Meeting, Buffalo, N. Y., pp.263-296.
14. Goldberg, D. T., Jaworski, W. E., and Gordon, M. D. (1976), "Lateral support systems and underpinning, construction methods", *Rep. FHWA-RD-75-128, 129 and 130*, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
15. Kim, N. K., Park, J. S., Han, M.Y., Kim, M. Y., and Kim, S. B. (2004), "Development of innovative prestressed support earth retention system", *Journal of the KGS*, Vol.20, No.2, pp.107-113.
16. Kim, N. K., Park, J. S., Jang, H. J., Han, M. Y., Kim, M. Y., and Kim, S. B. (2005), "Performance of innovative prestressed support earth retention system in urban excavation", *J. KGS*, Vol.21, No.2, pp.1-10.
17. Langhaar, H. L. (1951), *Dimensional analysis and theory of models*, John Wiley & Sons, Inc.
18. Park, J. S. (2006), "A New Earth Retention System with Prestressed Wales", Ph.D. Thesis, Sungkyunkwan Univ., Korea.
19. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967), *Soil mechanics in engineering practice*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y.
20. Troitsky, M. S. (1990), *Prestressed steel bridges*, Van Norstrand Reinhold.
21. Van Driest, E. R. (1946), "On dimensional analysis and the presentation of data in fluid flow problems", *J. Applied Mechanics*, Vol.13, No.1, pp.A-34.

(접수일자 2007. 4. 26, 심사완료일 2007. 7. 19)