

## PSC 일체식 교대 교량의 거동특성 평가

### Evaluation on Behavioral Characteristics of PSC Integral Abutment Bridge

안진희\* · 윤지현\*\* · 김상호\*\*\* · 김준환\*\*\*\*

Ahn, Jin-Hee · Yoon, Ji-Hyun · Kim, Sang-Hyo · Kim, Jun-Hwan

#### Abstract

Bridges constructed without any expansion joint or bridge bearing are called integral abutment bridges. They integrate the substructure and the superstructure. Possible deformation of the superstructure, due to changes in temperature for example, is prevented by the bending of the piles placed at the lower part of the abutment. This study examines the behavior of integral abutment bridges through soil-pile interaction modeling method and proposes an appropriate modeling method. Also, it assesses the behavior characteristics of the superstructure and piles of integral abutment bridges through parametric study. Soil condition around the pile, abutment height, and pile length were selected as parameters to be analyzed. Structural analysis was conducted while considering the interactions of soil-pile and temperature change-earth pressure on the abutment. Comparative behavior analysis through soil-pile interaction modeling showed that elastic soil spring method is more appropriate in evaluating the behavior of integral abutment bridges. The parametric study showed the tendency that as the soil stiffness around the pile increases, the moment imposed on the superstructure increases, and the displacement of the piles decreases. In addition, it was observed that as the bridge height increases, the earth pressure on the abutment increases and that in turn affects the behavior of the superstructure and piles. Also, as the length of the pile increased, the integral bridge showed more flexible behavior.

**Keywords :** *integral abutment bridge, soil-pile interaction, parametric study, behavioral characteristics*

#### 요 지

일체식 교대 교량은 신축이음장치 및 교좌장치가 없이 하부구조와 상부구조를 일체화한 구조형식으로, 상부구조의 온도변화 등에 의해 발생하는 변형을 교대하부에 배치한 파일의 휨 변형을 통하여 해소하는 교량형식이다. 본 연구에서는 지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 일체식 교대 교량의 거동비교를 통하여 합리적인 모형화 방법을 제시하고, 매개변수 해석을 통하여 일체식 교대 교량의 상부구조 및 파일의 거동특성을 평가하였다. 매개변수 해석을 위해 파일 관입부 지반조건, 교대 높이, 파일 길이를 매개변수로 선정하였고, 지반-파일 및 온도변화-교대배면토압 상호관계를 고려하여 구조해석을 수행하였다. 지반-파일 상호관계 모형화에 따른 일체식 교대 교량의 거동을 비교한 결과 탄성지반스프링 방법이 일체식 교대 교량의 거동을 평가하는데 보다 합리적인 것으로 판단된다. 일체식 교대 교량의 매개변수 해석 결과 파일 관입부 지반강성이 증가할수록 상부구조에 작용하는 모멘트가 증가하고 파일의 변위가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 교대의 높이가 증가할수록 교대배면토압이 증가하고 이것이 상부구조 및 파일의 거동에 영향을 주었음을 확인하였으며, 파일의 길이가 증가할수록 일체식 교대 교량이 유연한 거동을 보임을 확인하였다.

**핵심용어 :** 일체식 교대 교량, 지반-파일 상호관계, 매개변수 해석, 거동특성

#### 1. 서 론

일체식 교대 교량(Integral Abutment Bridge)은 그림 1과 같이 교량 전체에 신축이음장치를 두지 않고 상부구조 및 하부구조를 교대에 일체화한 구조형식의 교량으로, 신축이음이 존재하지 않으므로 무조인트 교량(Jointless Bridge)이라고도 하며, 상부구조 및 하부구조가 교대에 일체로 구성되어 있기 때문에 일체식 교량(Integral Bridge)이라고도 한다. 일

체식 교대 교량은 신축이음 장치가 없어 차량이 고속주행을 하여도 주행성이 우수할 뿐만 아니라, 유지관리 비용을 최소화 할 수 있으며 유지보수가 편리하므로 일상적인 교량점검이 어렵거나 유지보수의 주기가 긴 지역에 유리하다. 또한, 그림 1과 같이 일체식 교대 교량의 하부구조로 크기가 작은 난쟁이 교대(남문석 등, 2006; 박영호 등, 2006; 한국도로공사 도로연구소, 1999)와 일렬의 수직 파일이 시공되므로 일반적인 교대와 다열말뚝 및 경사말뚝이 시공되는 일반 조인

\*정희원 · 연세대학교 BK21 미래사회기반시설안전학연구소 연구교수 · 공학박사 (E-mail : palanorange@yonsei.ac.kr)

\*\*정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 · 공학석사 (E-mail : yedjh@yonsei.ac.kr)

\*\*\*정희원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : sanghyo@yonsei.ac.kr)

\*\*\*\*(주)승하이엔씨 기술연구소 차장 · 공학박사 (E-mail : jhkim@newsh.co.kr)

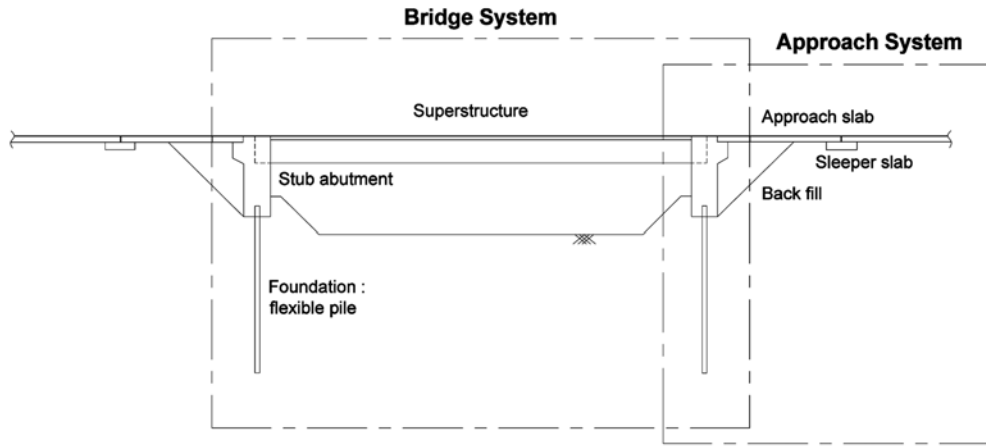


그림 1. 일체식 교대 교량의 개념도

트 교량에 비해 공사기간을 단축할 수 있으며, 상부구조가 교대에 고정되어 있어 지진하중에 대해 지반과 동시에 거동하고 상대 변위가 적어 일반 조인트 교량보다 내진성능이 우수하다.

이러한 일체식 교대 교량은 도로연장이 길어 관리대상 교량이 많은 북미지역에서 많이 시공되고 있으며, 영국, 스웨덴 등과 같은 유럽 국가에서도 중소지간 교량에 많이 적용되고 있다(AISI, 1996; Diceli, 2000; PCI, 2001; Frosch et al., 2006). 하지만 현재까지 국내에서는 하부 지반조건에 기반을 둔 일체식 교대 교량의 거동 분석에 관한 연구(박영호 등, 2000, 2001, 2006, 2007; 남문석 등, 2006)가 대부분이며, 상부구조-하부구조-지반의 상호작용이 반영된 전체적인 거동특성에 대한 연구가 부족하고 실제 시공사례 또한 제한적인 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지반-과일 상호관계 모형화 방법에 따른 일체식 교대 교량의 거동 비교를 통하여 합리적인 모형화 방법을 제시하고, 온도하중-교대배면 토압 상호관계를 고려한 매개변수 해석을 통하여 일체식 교대 교량의 전반적인 거동특성을 평가하고자 한다.

## 2. 일체식 교대 교량의 모형화 방법

일체식 교대 교량의 거동분석을 위하여 본 연구에서는 일체식 교대 교량에 작용하는 하중(온도하중 및 교대배면토압) 및 파일 관입부의 지반조건을 고려하였다. 이를 위하여 상부구조의 연중 및 일 온도변화와 이에 따른 교대배면토압을 주동토압과 수동토압으로 구분하여 구조해석에 적용하였으며, 파일 관입부의 지반조건을 고려한 지반-파일 상호관계를 반영하여 일체식 교대 교량을 모형화 할 수 있도록 하였다.

### 2.1 상부구조에 작용하는 온도변화 모형화

교량에 작용하는 온도변화에 의한 상부구조의 신축량은 연

중 온도변화에 의한 신축량과 일 온도변화에 따라 발생하는 상부구조 단면내의 온도경사에 의한 신축량으로 구분되며, 교량의 상부구조는 이러한 연중 및 일 온도변화에 따라 열 거동특성을 나타내게 된다. 도로교설계기준(2005, 건설교통부)에서는 교량의 종류에 따른 온도변화 범위 및 선행창 계수를 표 1과 같이 제시하고 있다. 본 연구에서도 연중 변화와 일 변화를 고려하여 하절기 온도 상승 시에는 +20°C, 동절기 온도 하강 시에는 -20°C의 온도하중과 일 온도변화에 따른 단면내의 온도경사를 발생시키도록 바닥판과 기타 부분의 온도차 5°C를 일체식 교대 교량의 구조해석에 적용하였다. 일 온도변화의 적용 시에 온도분포는 바닥판과 기타 부분에 있어서 균일하다고 가정하였다.

### 2.2 교대배면토압의 모형화

일반적으로 교대 뒤택움부의 토압분포를 고려할 경우에는 토압을 교대 벽면에 작용하는 분포하중으로, 교대와 뒤택움부 지반의 상대적인 변위와 관계하여 정지토압, 주동토압 및 수동토압으로 구분한다. 이러한 토압과 토압분포는 교대와 지반의 상대적인 변위, 교대의 형태, 뒤택움부의 토질종류 및 토층상태, 배면 지형, 상재하중조건 등을 고려하여 산정한다(2005, 건설교통부).

일반 조인트 교량이 단순 지지 거동을 보이고 교대배면토압이 상부구조의 거동에 영향을 미치지 못하는 반면에, 일체식 교대 교량은 상부구조와 하부구조가 일체로 되어 프레임 거동을 보인다. 따라서 일체식 교대 교량은 사용하중상태에서 보도나 연석, 아스팔트 포장 등에 의해 상부구조에 작용하는 합성 후 고정하중과 활하중이 하부구조에 전달될 뿐만 아니라, 연중 및 일 온도변화와 이에 따른 교대배면토압이 상부구조 및 하부구조의 거동에 큰 영향을 미친다. 이는 온도변화에 의한 일체식 교대 교량 상부구조의 신축이 일체화에 구조에 따른 구속에 의해 하부구조인 교대와 파일의 변

표 1. 교량 종류에 따른 온도변화 범위 및 선행창계수

| 교량종류          | 온도변화        |             | 선행창계수                |
|---------------|-------------|-------------|----------------------|
|               | 보통지방        | 한랭한 지방      |                      |
| PSC교, RC교     | -5°C~+35°C  | -15°C~+35°C | 1.0×10 <sup>-5</sup> |
| 강교(상로교)       | -10°C~+40°C | -20°C~+40°C | 1.2×10 <sup>-5</sup> |
| 강교(하로교/강바닥판교) | -10°C~+50°C | -20°C~+40°C | 1.2×10 <sup>-5</sup> |

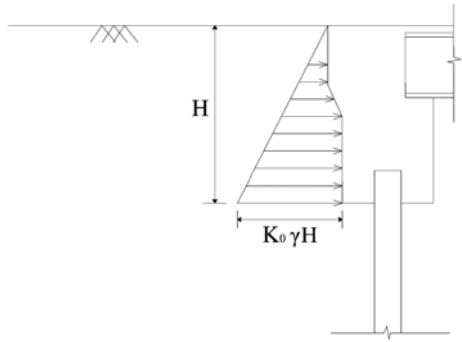


그림 2. 정지토압 분포

위를 발생시키고, 이로 인한 교대배면의 주동 또는 수동토압의 발생은 상부구조 및 하부구조의 거동에 영향을 미치게 되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 온도변화에 의한 상부구조의 신축과 이에 발생하는 교대배면토압의 상호작용을 일체식 교대 교량의 구조해석에 적용하기 위해 Rankine의 정지, 주동, 수동토압과 상부구조의 신축변위가 고려된 수정된 수동토압을 다음과 같이 제시하였다.

### 2.2.1 Rankine의 토압

정지토압은 상부구조의 온도변화가 발생하지 않은 상태에서 상부구조와 하부구조가 일체화된 교대의 배면에 작용하는 토압으로, 그림 2와 같이 교대 및 파일의 변위가 없을 때 작용하는 하중이다. 교대배면에 작용하는 Rankine의 정지토압 분포는 그림 2와 같으며 토압계수는 식 (1)과 같다.

$$\text{정지토압계수: } K_0 = 1 - \sin\phi \quad (1)$$

주동토압은 그림 3과 같이 온도가 하강하여 일체식 교대 교량의 상부구조가 수축하는 변위를 보일 때 교대의 배면에 작용하는 토압으로, 교대 및 파일이 교량의 내측 방향으로 변위가 발생하였을 때 작용하는 하중이다. 따라서 일체식 교대 교량에 작용하는 주동토압은 구조해석 시 온도하강에 의한 상부구조의 수축과 함께 고려해 주어야 한다. 교대배면에 작용하는 Rankine의 주동토압 분포는 그림 3과 같으며 토압계수는 식 (2)와 같다.

$$\text{주동토압계수: } K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

수동토압은 그림 4와 같이 온도가 상승하여 일체식 교대 교량의 상부구조가 팽창하는 변위를 보일 때 교대의 배면에 작용하는 토압으로, 교대 및 파일이 교량의 외측 방향으로 변위가 발생하였을 때 작용하는 하중이다. 따라서 일체식 교대 교량에 작용하는 수동토압은 구조해석 시 온도상승에 의한 상부구조의 팽창과 함께 고려해 주어야 한다. 교대배면에 작용하는 Rankine의 수동토압 분포는 그림 4와 같으며 토압계수는 식 (3)과 같다.

$$\text{수동토압계수: } K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (3)$$

### 2.2.2 수정된 수동토압

온도상승으로 인하여 일체식 교대 교량 상부구조의 팽창이 발생하고 Rankine의 수동토압이 작용할 때, 토압계수는 뒤체움부 토질의 고유 값에 따라 결정된다. 하지만, 실제 일체식

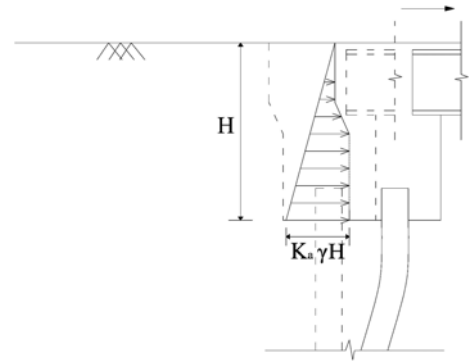


그림 3. 주동토압 분포(온도 하강 시)

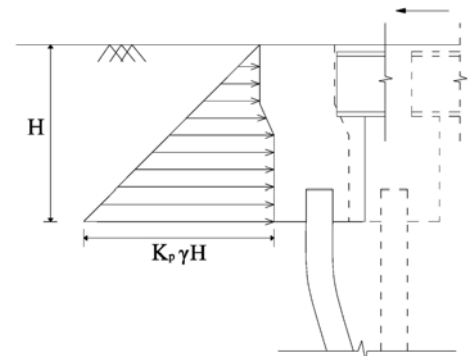


그림 4. 수동토압 분포(온도 상승 시)

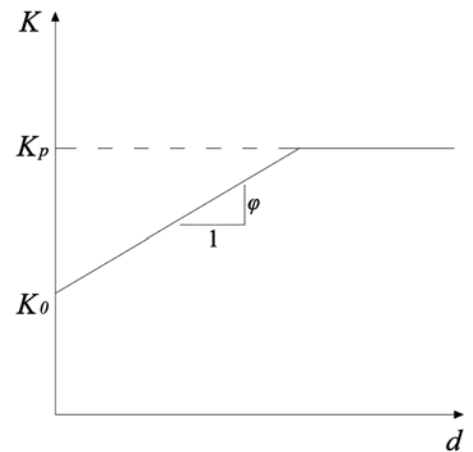


그림 5. 상부구조의 변위에 따른 수동토압계수의 변화

교대 교량에 작용하는 수동토압을 검토하기 위해서는 토질의 고유 값뿐만 아니라 교대 및 파일의 변위 또는 회전 등에 대한 고려가 이루어져야 한다. 일체식 교대 교량의 교대배면에 수동토압이 작용하는 경우 토압의 크기는 상부구조 온도 변위(팽창변위)의 크기에 영향을 받으며, 실제 수동토압계수 K는 Rankine의 정지토압계수 K0와 Rankine의 수동토압계수 Kp 사이에 존재한다. 이러한 실제 토압계수 K는 실험과 유한 요소해석을 통하여 그림 5와 같은 분포로 가정하여 나타낼 수 있으며, 이는 식 (4)와 같이 일체식 교대 교량 상부구조의 팽창변위와 뒤체움부 토질의 종류에 따라 결정된다 (Dicleli, 2000).

$$\text{수정된 수동토압계수: } K = K + \phi d \leq K_p \quad (4)$$

일체식 교대 교량에 작용하는 실제 수동토압계수 K는 다음과 같은 방법으로 산정할 수 있다. 그림 6과 같이 이상화

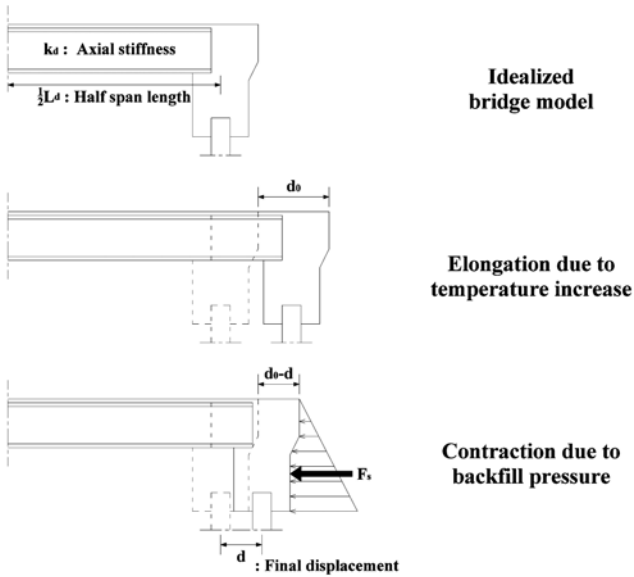


그림 6. 일체식 교대 교량의 팽창변위-교대배면토압 상호작용

된 교량에서 온도상승으로 발생하는 자유팽창변위  $d_0$ 와 일체식 교대 교량의 교대배면토압  $F_s$ 의 합성효과에 의해 상부구조의 최종팽창변위  $d$ 가 결정된다. 이때 이상화된 일체식 교대 교량의 축 방향 강성은 식 (5)와 같이 표현되며, 양단의 교대 형상을 동일하고 상부구조에 대한 파일의 휨 강성을 무시한다고 가정하면 교대배면토압  $F_s$ 는 교량의 상부구조에 모두 전달되며 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다. 교대배면토압에 의해 상부구조에 작용하는 축력  $F_d$ 는 식 (5)로부터 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며, 온도상승에 의한 교량의 자유팽창변위  $d_0$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 일체식 교대 교량의 상부구조에 작용하는 교대배면토압  $F_s$ 와 축력  $F_d$ 가 교축방향으로 힘의 평형을 만족시켜야 하므로, 식 (7), (8), (9)에 의해 상부구조의 최종팽창변위  $d$ 는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 실제 수동토압계수  $K$ 는 식 (4), (10)에 의해 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 산정할 수 있는 수정된 수동토압계수는 일체식 교대 교량에 작용하는 실제 수동토압계수에 근접한 값이며, 구조해석 시 온도상승에 의한 상부구조의 팽창과 함께 고려해 주어야 한다.

$$k_d = \frac{2E_g(A_g + nA_s)}{L_d} \quad (5)$$

$$F_s = \frac{1}{2}h^2w_e\gamma_sK \quad (6)$$

$$F_s = \frac{1}{3}h^2w_e\gamma_s(K_0 + \phi d) \quad (7)$$

$$F_d = \frac{2E_g(A_g + nA_s)}{L_d}(d_0 - d) \quad (8)$$

$$d_0 = \frac{1}{2}\sigma\delta TL_d \quad (9)$$

$$d = \frac{2\alpha\delta TE_g(A_g + nA_s) - h^2w_e\gamma_sK_0}{\frac{4E_g(A_g + nA_s)}{L_d} + h^2w_e\gamma_s\phi} \quad (10)$$

$$K = \frac{2K_0 + \alpha\delta TL_d\phi}{2 + \frac{L_d h^2 w_e \gamma_s \phi}{2E_g(A_g + nA)}} \leq K_p \quad (11)$$

현재 일체식 교대 교량의 토압에 대해 대다수 설계자들은 사용하기 편리한 Rankine의 고전적인 토압이론을 사용하여 교대배면토압을 산정하고 있지만, Rankine의 수동토압은 실제로 작용하는 수동토압보다 과대하게 산정되는 경향이 있다. 실제 작용 토압과 유사한 해석을 할 수 있는 방법에 대해 연구 자료를 조사한 결과, 수동토압을 산정·적용하는 다양한 방법 중에 배면토압을 스프링모델로 적용한 경우와 유사한 결과를 나타내는 것은 Rankine의 수동토압의 1/2 크기를 삼각형 분포로 적용시킨 경우와 Diceli가 제안한 수정된 수동토압을 적용시킨 경우로 나타났다. 국내 일체식 교량 설계지침(2009, 한국도로공사 도로교통연구원)에서는 설계 수동토압을 Rankine의 수동토압의 1/2 크기를 적용한 평가방법과 교대의 상대변위를 적용한 평가방법 중 큰 값으로 평가한다고 규정하였다. 또한, 실제 일체식 교대 교량(PSC거더, 3@30 m, 사각 30°)에 대한 교대배면의 장기 토압을 실측한 결과, 최대 수동토압이 Rankine의 수동토압의 약 9% 값을 보이는 것을 알 수 있다(박영호 등, 2007). 이상의 결과들을 참고하여 실제 작용 수동토압과 가장 유사하면서도 합리적인 설계가 가능한 Diceli의 수정된 수동토압이 일체식 교대 교량에 작용하는 수동토압으로 적합하다고 판단하여, 본 연구에서는 Diceli의 수정된 수동토압을 구조해석 시 온도상승에 의한 상부구조의 팽창과 함께 고려하였다.

### 2.3 지반-파일 상호관계 모형화

일체식 교대 교량에서 파일의 거동은 파일의 종류 및 규격, 파일의 축 방향(강축 및 약축), 관입부 지반조건에 의해 결정된다. 일체식 교대 교량의 파일 구조해석 시에는 일반적으로 등가캔틸레버 파일 방법과 탄성지반스프링 방법이 사용되는데, 파일 관입부의 지반과 파일의 상호관계 표현에 있어 큰 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 구조해석을 통하여 일체식 교대교량에 보다 적합한 지반-파일 상호관계 모형화 방법을 제시하고, 이를 일체식 교대 교량의 거동특성 평가를 위한 매개변수 해석에 적용하고자 한다.

#### 2.3.1 등가캔틸레버 파일 방법

국내의 일체식 교량 설계지침(2009, 한국도로공사 도로교통연구원)에서 규정한 등가캔틸레버 파일 방법은 등가조건을 만족시키는 등가캔틸레버 유효길이를 파일을 모형화하여 구조해석에 적용하는 방법이다. 이 방법은 그림 7과 같이 등가캔틸레버 유효길이 이상의 깊이에 존재하는 파일의 수평변위는 무시하고, 등가캔틸레버 파일 끝단은 고정지지된 것으로 가정하여 유효길이만큼의 파일부재의 거동을 고려하는 모형화 방법이다. 파일의 등가캔틸레버 유효길이는 식 (12)와 같다.

$$l_e = l + C_p l_c = l_u + C_p \left( 4 \sqrt{\frac{E_p I_p}{k_h}} \right) \quad (12)$$

여기서,  $l_u$ 는 지지되지 않은 부분의 파일길이이며, 지반에 파일이 모두 매입되었을 경우 0이다.  $C_p$ 는  $l_e/l_c$ 로 등가조건에 따른 계수이며,  $l_c$ 는 파일머리부의 수평변위보다 매우 작은 변위(약 4%)를 보이는 파일의 캔틸레버 길이를 의미한다

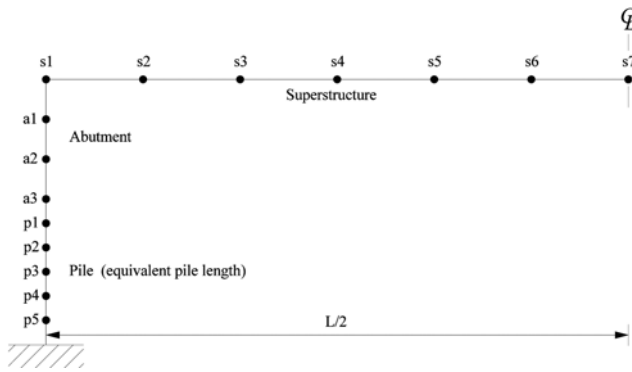


그림 7. 등가 캔틸레버 파일 방법을 이용한 일체식교대교량 모형화

(Abendroth *et al.*, 1989).

이러한 등가캔틸레버 파일 방법의 유효길이는 만족시키고자하는 등가조건에 따라 상이하게 정의된다. 파일의 유효길이에 대한 등가조건은 횡방향 강성, 휨모멘트, 좌굴하중에 대한 등가조건으로 구분된다. 횡방향 강성에 대한 등가조건은 실제 파일과 횡방향 변위가 동일하도록 하는 캔틸레버 파일의 길이 조건이며, 휨모멘트에 대한 등가조건은 실제 파일에 발생하는 최대휨모멘트와 동일한 최대휨모멘트가 발생하게하기 위한 캔틸레버 파일의 길이 조건이다. 좌굴하중에 대한 등가조건은 지반조건을 고려한 실제 파일의 좌굴하중과 동일한 좌굴하중을 갖도록 하는 캔틸레버 파일의 길이 조건을 의미한다. 이처럼 등가조건에 따라 그림 8과 같이 다른 계수( $C_p$ )를 유효길이 산정에 적용하기 때문에 등가캔틸레버 파일 방법을 일체식 교대 교량의 모형화 및 구조해석에 적용한다면, 만족시키고자하는 등가조건에 따라 파일의 등가캔틸레버 유효길이가 상이해진다는 단점이 있다. 그림 8은  $l_u/l_c$ 에 대한 등가조건에 따른 계수  $C_p(=l_e/l_c)$ 의 관계를 나타낸 그래프이다(Abendroth *et al.*, 1989).

### 2.3.2 탄성지반스프링 방법

탄성지반스프링 방법은 등가캔틸레버 파일 방법과 달리 모형화 과정에서 전체 파일 길이에 대하여 파일 깊이별 횡방향 강성을 탄성스프링으로 직접 적용함으로써 실제 일체식 교대 교량의 파일 거동과 유사하게 해석이 가능하다. 이러한

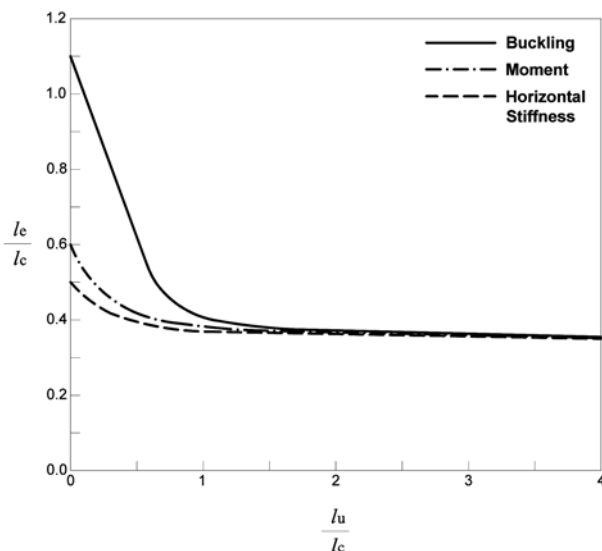


그림 8. 파일의 등가조건에 따른 계수 관계

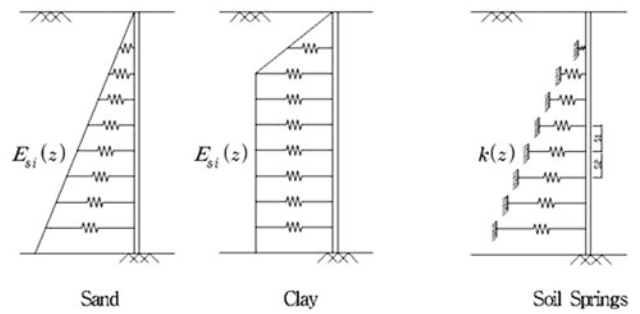


그림 9. 탄성지반스프링 방법

탄성지반스프링 방법은 파일에 작용하는 지반반력을 그림 9와 같이 탄성스프링으로 모형화하며, 파일의 길이방향에 대해 스프링이 일정한 간격으로 배치되고 각각의 스프링은 서로 상호작용이 없다고 가정한다. 따라서 각각의 스프링은 지반조건, 파일크기, 지표면으로부터의 깊이에 따라 다른 강성을 갖게 된다. 탄성지반스프링 방법에 적용되는 스프링 강성  $k(z)$ 는 식 (13)과 같이 지표면으로부터의 깊이  $z$ 에서 파일 관입부 지반  $p$ - $y$  곡선의 초기강성 또는 초기계수로 표현되는  $E_{si}(z)$ 와 스프링 간격  $s(=s_1/2+s_2/2)$ 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$k(z) = E_{si}(z) \cdot s \quad (13)$$

사질토 지반의 초기강성  $E_{si}(z)$ 는 식 (14)와 같이 정의되며, 여기서 지반의 탄성계수  $E_m$ 은 식 (15)와 같이 사질토의 평균유효단위중량  $\gamma$ , 지표면으로부터의 깊이  $z$ 와 사질토의 종류에 따라 결정되는 상수  $J$ 에 의해 결정된다.

$$E_{si}(z) = \frac{E_m}{1.35} \quad (14)$$

$$E_m = J\gamma z \quad (15)$$

점성토 지반의 초기강성  $E_{si}(z)$ 는 soft clay, stiff clay에 대해서는 식 (16)과 같이, very stiff clay에 대해서는 식 (17)과 같이 극한지반저항  $p_u$ 와 극한지반저항의 1/2에 대한 변위  $y_{50}$ (soft clay, stiff clay:  $2.5B\varepsilon_{50}$ , very stiff clay:  $2.0B\varepsilon_{50}$ )에 의해 정의된다. 여기서 soft clay, stiff clay에 대한 극한지반저항  $p_u$ 는 식 (18)에 의해, very stiff clay에 대해서는 식 (19)에 의해 결정된다.

$$E_{si}(z) = \frac{P_u}{y_{50}} \quad (16)$$

$$E_{si}(z) = \frac{P_u}{2y_{50}} \quad (17)$$

$$p_u(z) = \text{lesser of} \left\{ \begin{array}{l} \left[ 3 + \frac{\gamma z}{c_u} + \frac{0.5}{B} z \right] \cdot c_u B \\ 9c_u B \end{array} \right. \quad (18)$$

$$p_u(z) = \text{lesser of} \left\{ \begin{array}{l} \left[ 3 + \frac{\gamma z}{c_u} + \frac{2}{B} z \right] \cdot c_u B \\ 9c_u B \end{array} \right. \quad (19)$$

## 3. 일체식 교대 교량의 거동분석

### 3.1 구조해석 대상교량 및 조건

본 연구에서는 합리적인 지반-파일 상호관계 모형화 방법

을 제시하고, 온도하중-교대배면토압 상호관계를 고려한 매개변수 해석을 통하여 일체식 교대 교량의 거동특성을 평가하기 위하여 30 m 단경간 PSC I 거더 일체식 교대 교량을 대상으로 구조해석 및 매개변수 해석을 수행하였다. 대상 교량의 상부구조는 그림 10 (a), (b)와 같이 한국도로공사 표준 PSC I 거더(지간: 30 m, 높이: 2 m)로 모형화 하였으며(2005, 한국도로공사 도로교통기술원), 교대 및 파일은 그림 10(c)와 같이 일체식 교량 설계지침(2009, 한국도로공사 도로교통연구원)에 제시된 형상으로 모형화 하였다. 또한, 대상교량의 파일은 H350×350의 H형강으로 상부구조의 온도신축에 대해 유연한 거동을 보이도록 교대 중심선과 나란하게 일렬로 약축 배치하였다. 일체식 교대 교량에 대한 구조해석은 범용구조해석 프로그램인 MIDAS Civil을 이용 하였으며, 대상 교량을 그림 11과 같이 프레임 요소로 모형화 하였다.

일체식 교대 교량은 사용주기 동안 온도변화로 인하여 주기적으로 수축과 팽창 거동을 보이므로 교대배면토압을 결정할 때 온도변화와의 상호관계가 고려되어야한다. 따라서 본 연구에서는 2장의 내용을 참고하여 표 2와 같이 LC-1, LC-2의 하중조합을 구조해석 및 매개변수 해석에 적용하였

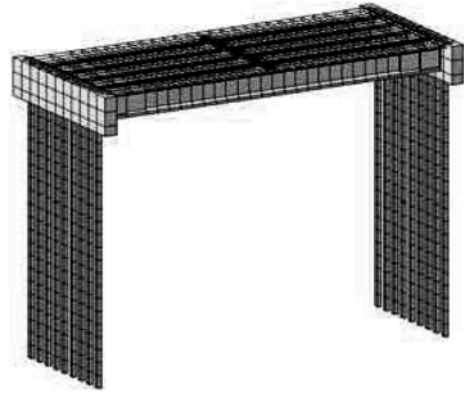


그림 11. 대상구조물의 모형화

다. 교대배면토압의 산정 시 뒤채움재는 일반적으로 일체식 교대 교량의 뒤채움재로 사용되는 Granular Soil Type B(내부마찰각  $\phi=30^\circ$ , 단위중량  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ )를 적용하였다. 또한, 일체식 교대 교량의 거동특성을 평가하기위해 본 연구에서는 표 3과 같이 매개변수를 선정하여 매개변수 해석을 수행하였다. 이때, Parameter-1(파일 관입부 지반조건)에 대해

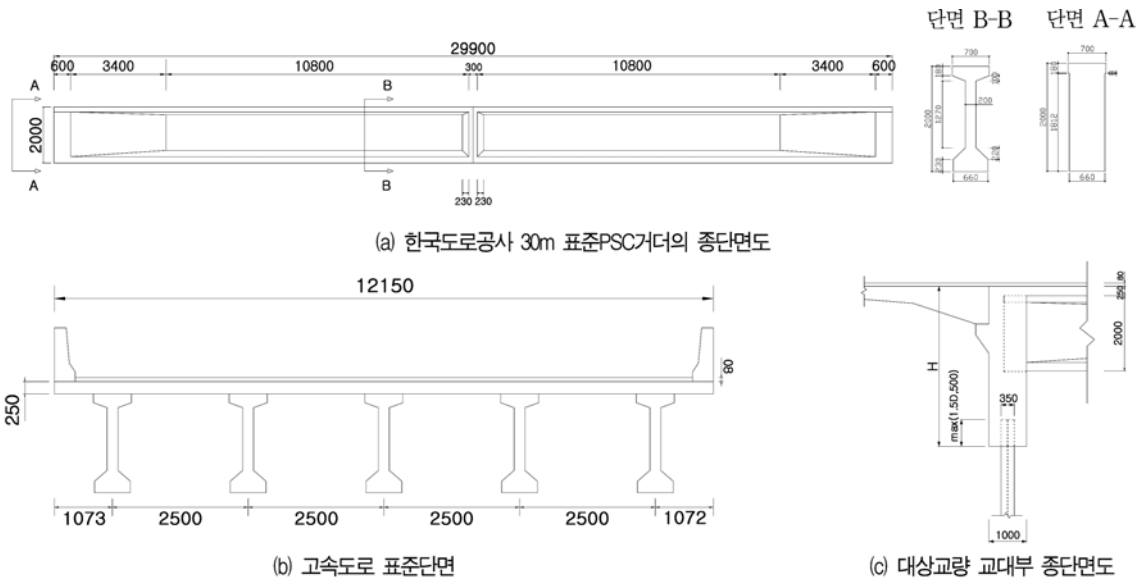


그림 10. 대상교량의 상부·하부구조 단면도 (단위: mm)

표 2. 일체식 교대 교량의 구조해석에 적용된 하중

| 하중종류 | 온도하중    |                      | 교대배면토압            |
|------|---------|----------------------|-------------------|
|      | 연중 온도변화 | 일 온도변화               |                   |
| LC-1 | +20°C   | 5°C<br>(바닥판과 거더 온도차) | Dicledi의 수정된 수동토압 |
| LC-2 | -20°C   |                      | Rankine의 주동토압     |

표 3. 일체식 교대 교량의 매개변수 해석에 고려된 매개변수

| 매개변수        |             | 매개변수의 범위  |
|-------------|-------------|---|
| Parameter-1 | 파일 관입부 지반조건 | 사질토 : Loose sand, Medium sand, Dense sand<br>점성토 : Soft clay, Stiff clay, Very stiff clay   |
| Parameter-2 | 교대 높이       | 2~6 m (1 m 씩 증가)  |
| Parameter-3 | 파일 길이       | 5~40 m (5 m 씩 증가)   |
| 일반사항        |             | <ul style="list-style-type: none"> <li>파일 관입부 지반조건 : 사질토 (Loose sand)</li> <li>교대 높이 : 3 m, 교대 폭 : 1 m</li> <li>파일 길이 : 20 m (교대 당 9개, 일렬 약축 배치)</li> <li>지반-파일 상호관계 : 탄성지반스프링 방법 적용</li> </ul> |

적용한 지반스프링의 강성은 그림 9 및 식 (13)~(19)에 의해 산정하였으며, 각각의 지반조건에 대하여 지반스프링 강성(계수)을 Loose sand의 경우 0~63.5 MN/m, Medium sand의 경우 0~190.5 MN/m, Dense sand의 경우 0~476.2 MN/m, Soft clay의 경우 0~3.2 MN/m, Stiff clay의 경우 0~25.9 MN/m, Very stiff clay의 경우 0~646 MN/m의 범위로 0~20 m 깊이에 각 깊이별로 산정된 값으로 적용하였다.

### 3.2 지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 거동특성

매개변수 해석을 통한 일체식 교대 교량의 거동특성을 평가하기 위해 앞서, 본 절에서는 2.3절에서 기술한 두 가지의 지반-파일 상호관계 모형화 방법(등가캔틸레버 파일 방법, 탄성 지반스프링 방법)을 일체식 교대 교량의 구조해석에 적용하고 모형화 방법에 따른 거동을 비교하여 보다 합리적인 모형화 방법을 제시하고자 한다. 등가캔틸레버 파일 방법의 적용 시에는 휨모멘트 등가조건을 기준으로 식 (12)에 의해 산정된 유효길이  $l_e$ (3.61 m)로 파일을 모형화 하였으며, 파일 관입부의 지반강성을 일괄적으로 모형화 하였다. 탄성지

반스프링 방법의 적용 시에는 파일 전체를 모형화하고, 깊이 에 따른 스프링계수는 식 (13)에 의해 산정하였다.

지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 일체식 교대 교량의 구조해석 결과를 그림 12, 13에 LC-1 및 LC-2 하중조합에 대한 거더 및 파일의 응력으로 나타내었다. 그림 12의 지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 거더의 응력(거더의 위치별(0, 10, 15 m : 좌우대칭 이므로 절반만 표기) 응력)에서 확인할 수 있듯이 LC-1 하중조합에 대한 상·하연 응력 모두 등가캔틸레버 파일 방법을 적용한 경우가 탄성지반스프링 방법을 적용한 경우보다 비교적 적게 나타났다. 하지만, LC-2 하중조합에 대해 모든 위치의 상연에 작용하는 응력은 탄성지반스프링 방법을 적용한 경우가 등가캔틸레버 파일 방법을 적용한 경우보다 비교적 적게 나타났으며, 하연에 작용하는 응력은 거더의 단부인 0 m 위치에서 탄성지반스프링 방법을 적용한 경우가 등가캔틸레버 파일 방법을 적용한 경우보다 비교적 작게 나타난 반면에 거더의 중앙부인 10, 15 m 위치에서는 탄성지반스프링 방법을 적용한 경우가 등가캔틸레버 파일 방법을 적용한 경우보다 약 2배 정도 크게

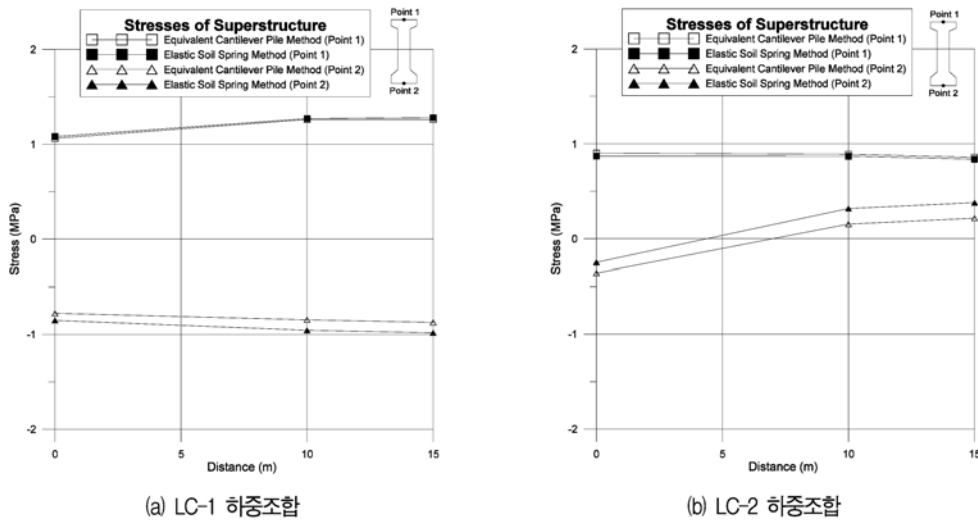


그림 12. 지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 일체식 교대 교량 상부구조의 응력 비교

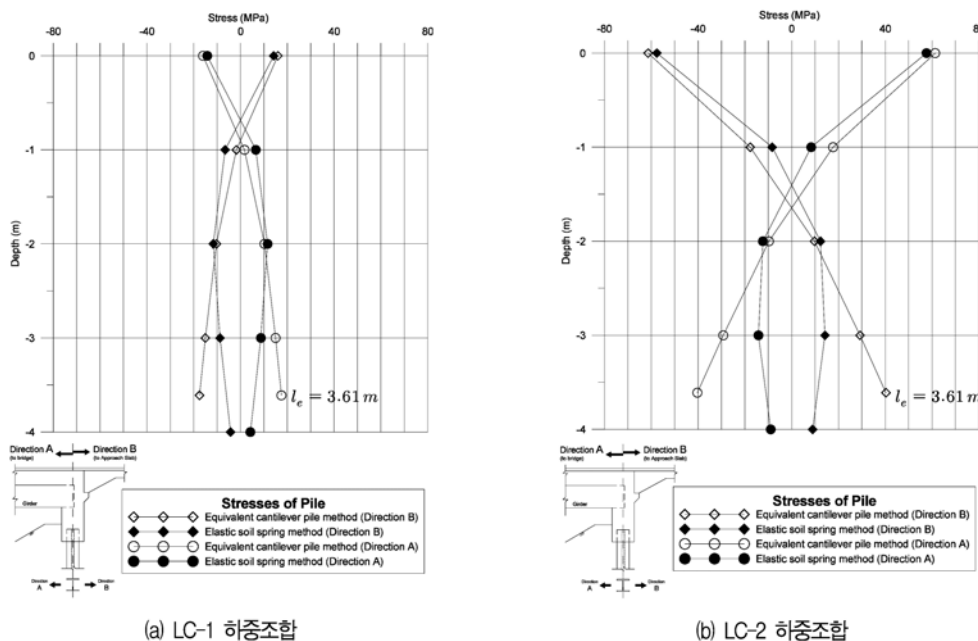


그림 13. 지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 일체식 교대 교량 파일의 응력 비교

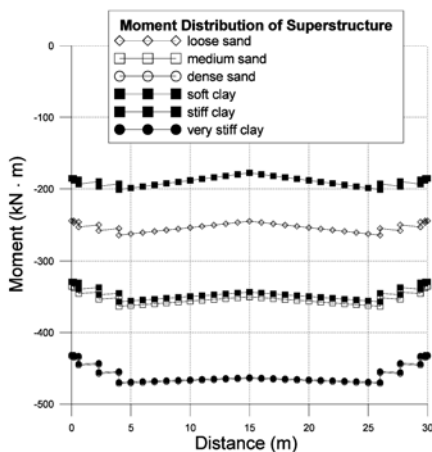
나타났다. 이는 LC-2 하중조합에 의한 거더의 수축변위 및 휨 변형을 탄성지반스프링 방법은 파일 전체에 작용하는 지반의 강성이 흡수하는 반면, 등가캔틸레버 파일 방법은 고정단을 가지는 등가유효길이의 파일이 흡수하기 때문이라고 사료된다. 즉, 상대적으로 짧은 길이의 파일과 단부 고정단이 모형화된 등가캔틸레버 파일 방법이 실제 유연한 파일의 휨 거동을 제한하기 때문에 이와 같은 거동특성을 보인다. 그림 13의 지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 파일의 응력에서 확인할 수 있듯이 일정 깊이까지는 두 방법 모두 비슷한 경향을 보인다. 하지만 등가캔틸레버 파일의 유효길이 깊이가 (3.61 m)에 가까워질수록 등가캔틸레버 파일 방법을 적용한 경우의 파일의 응력이 탄성지반스프링 방법을 적용한 경우보다 증가함을 확인할 수 있다. 이는 등가캔틸레버 파일 방법을 적용할 때 유효길이 깊이에서 파일의 단부 경계조건을 회전 및 변위에 대해 고정지지단으로 적용하므로 고정단 모멘트에 의해 추가적인 응력이 발생하였기 때문이라고 사료된다. 이와 같은 거동특성을 보이는 등가캔틸레버 파일 방법은 실제 파일의 거동을 표현하는데 제한이 될 것으로 판단된다.

등가캔틸레버 파일 방법과 탄성지반스프링 방법 모두 일체

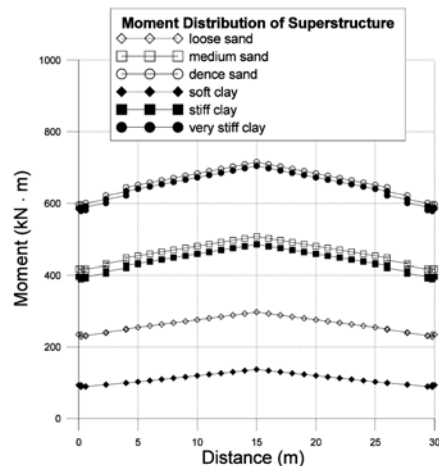
식 교대 교량의 설계 및 해석에 적용될 수 있는 지반-파일 상호관계 모형화 방법이지만, 실제 파일의 거동 및 일체화된 상부구조의 거동을 표현하는데 탄성지반스프링 방법이 보다 합리적인 모형화 방법이라고 사료된다. 또한 2.3절에서 언급하였듯이, 등가캔틸레버 파일 방법은 파일의 등가조건에 따라 파일을 서로 다른 유효길이로 모형화해야 한다는 단점이 있으며, 탄성지반스프링 방법은 실제 파일 길이를 지닌 파일에 실제 파일 관입부의 지반조건을 고려한 지반강성을 스프링으로 모형화하므로 일체식 교대 교량의 거동을 보다 정확하게 묘사할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 이후 수행되는 매개변수해석에는 지반-파일 상호관계 모형화 방법으로 탄성지반스프링 방법을 적용하여 일체식 교대 교량을 모형화하고 구조해석을 수행하였다.

### 3.3 일체식 교대 교량의 매개변수 해석

본 연구에서는 일체식 교대 교량의 전반적인 거동특성을 평가하기 위해 파일 관입부 지반조건에 따른 매개변수 해석과 교대 높이에 따른 매개변수 해석, 파일 길이에 따른 매개변수 해석을 수행하였으며 해석결과는 다음과 같다. 매개변수 해석결과는 온도하중-교대배면토압 상호관계를 고려하

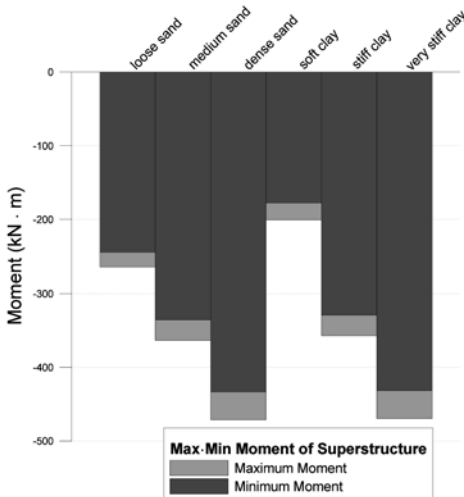


(a) LC-1 하중조합

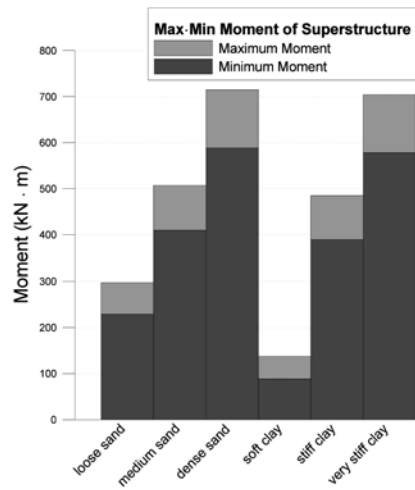


(b) LC-2 하중조합

그림 14. 파일 관입부 지반조건에 따른 일체식 교대 교량 상부구조의 모멘트 분포



(a) LC-1 하중조합



(b) LC-2 하중조합

그림 15. 파일 관입부 지반조건에 따른 일체식 교대 교량 상부구조의 최대·최소 모멘트



여 LC-1과 LC-2의 하중조합에 대하여 구분하여 나타내었다.

### 3.3.1 파일 관입부 지반조건에 따른 일체식 교대 교량의 매개변수 해석

파일 관입부 지반조건에 따른 일체식 교대 교량의 상부구조(거더)에 작용하는 모멘트 분포 및 최대·최소 모멘트를 각각 그림 14, 15에 나타내었다. 일체식 교대 교량 상부구조의 모멘트 분포(그림 14)에서 확인할 수 있듯이 온도상승시(LC-1 하중조합)에는 상부구조의 팽창변위에 대해 교대배면토압과 파일의 휨 강성 및 파일 관입부의 지반반력이 저항하여 상부구조 전체가 부모멘트 분포를 보이며, 온도하강시(LC-2 하중조합)에는 상부구조의 수축변위에 대해 파일의 휨 강성 및 파일 관입부의 지반반력이 저항하여 상부구조 전체가 정모멘트 분포를 보인다. 그림 15에서 확인할 수 있듯이 LC-1, LC-2 하중조합 및 사질토, 점성토 종류에 관계없이 지반 강성이 클수록 일체식 교대 교량의 상부구조에 작용하는 모멘트가 증가하는 경향을 보인다. 파일 관입부 지반조건이 Loose sand인 경우 상부구조에 작용하는 최대 모멘트는 Dense sand와 비교하여 LC-1 하중조합에 대해 약 53%, LC-2 하중조합에 대해 약 42%의 수준으로 나타났다.

또한, 파일 관입부 지반조건이 Soft clay인 경우 상부구조에 작용하는 최대 모멘트는 Very stiff clay와 비교하여 LC-1 하중조합에 대해 약 38%, LC-2 하중조합에 대해 약 19%의 수준으로 나타났다. 이는 온도변화에 의해 발생하는 상부구조의 수축 및 팽창변위를 저항하는 성분으로 파일 관입부의 지반 저항이 큰 영향을 미치며, 이 저항의 정도는 지반의 강성에 의해 결정되기 때문이라고 판단된다. 따라서 일체식 교대 교량의 설계 시에 파일 관입부의 지반조사를 수행하여 지반강성을 산정하고, 이를 설계에 적절히 반영하도록 하여야 한다.

LC-1 및 LC-2 하중조합 조건 하에서 파일 관입부 지반조건에 따른 파일(하부구조)의 최대·최소 모멘트와 파일의 깊이별 변위를 각각 그림 16, 17에 나타내었다. 그림 16에서 확인할 수 있듯이 LC-1과 LC-2의 하중조합에 대해 파일 관입부 지반조건이 Loose sand인 경우 파일에 작용하는 모멘트는 각각 -8.61~7.38 kN·m, -51.18~12.05 kN·m의 모멘트가 발생하는 반면, Dense sand인 경우는 각각 -17.82~0.77 kN·m, -50.38~16.56 kN·m의 모멘트가 발생하였다. 이처럼 파일 관입부 지반강성이 증가 할수록 일체식 교대 교량의 파일에 작용하는 모멘트의 범위( $M_{max}-M_{min}$ )는

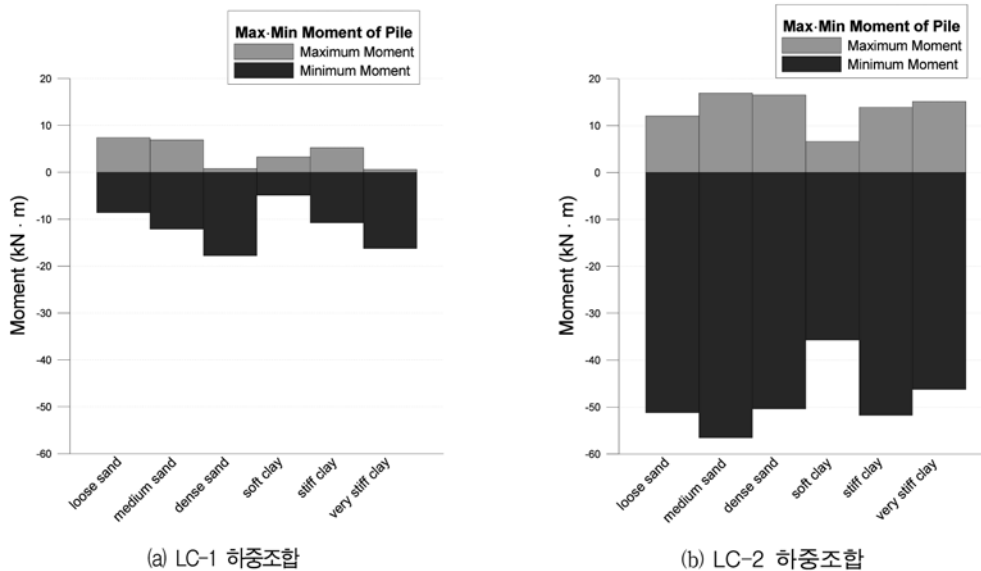


그림 16. 파일 관입부 지반조건에 따른 일체식 교대 교량 파일의 최대·최소 모멘트

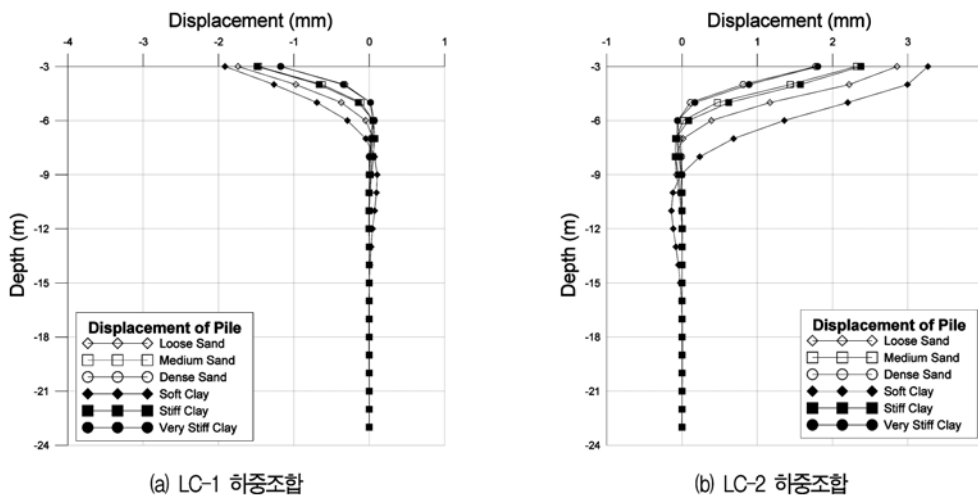


그림 17. 파일 관입부 지반조건에 따른 일체식 교대 교량 파일의 깊이별 변위

비교적 증가함을 알 수 있는데, 이는 그림 17에 나타났듯이 지반강성이 증가 할수록 상부구조의 수축 및 팽창변위와 파일의 유연한 거동을 억제하기 때문이라고 사료된다. 기존의 일부 연구 및 설계 사례에서 온도하강 시 주동토압의 영향이 적어 이를 무시하는 경우도 있다. 하지만 그림 16, 17에 나타났듯이 온도하강 시(LC-2 하중조합) 파일의 부모멘트 및 파일 상단의 변위가 온도상승 시(LC-1 하중조합) 보다 큼을 확인할 수 있다. 이는 온도하강 시 교대배면에 작용하는 주동토압이 상부구조의 수축변위 및 파일 최상단의 변위를 증가시켰기 때문이라고 판단된다. 따라서 일체식 교대 교량의 설계 시, 지반-파일 및 온도하중-교대배면토압 상호관계를 적절히 반영하여 합리적인 설계가 되도록 해야 한다.

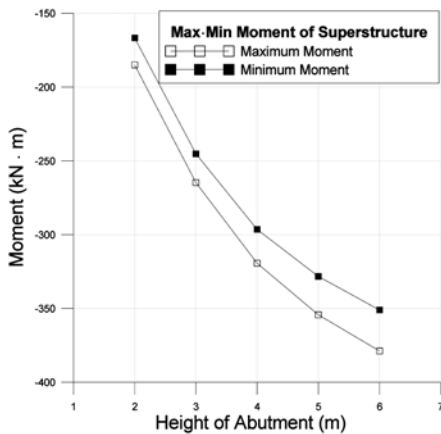
### 3.3.2 교대 높이에 따른 일체식 교대 교량의 매개변수 해석

교대 높이는 교대배면토압에 영향을 미치는 변수이므로 교대 높이변화에 따른 일체식 교대 교량의 거동특성을 파악할 필요가 있다. 따라서 교대 높이를 매개변수로 하여 교대 높이에 따른 교대배면토압을 산정하고 이를 구조해석에 적용하여 매개변수 해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 18, 19, 20에 나타내었다. 그림 18에서 확인할 수 있듯이 LC-1 하중조합에 대해서는 교대 높이가 증가할수록 상부구조에 작용하는 부모멘트가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 교대 높

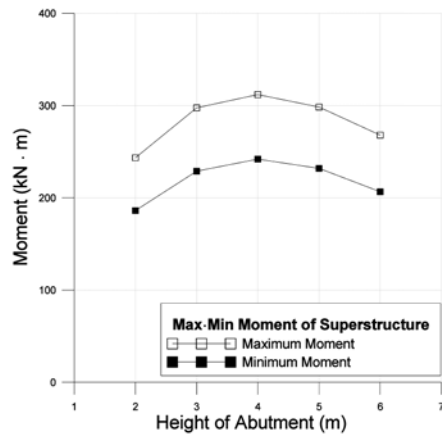
이가 증가할수록 교대배면에 작용하는 수동토압이 증가하였기 때문이라고 사료된다. 반면에 LC-2 하중조합에 대해서는 교대 높이가 4 m일 경우 최대 정모멘트를 나타낸다. 이처럼 교대의 높이가 낮을수록 교대배면토압이 감소하므로, 일체식 교대 교량에 보다 효과적으로 적용될 수 있는 교대는 그 크기가 작은 난쟁이교대임을 확인할 수 있다.

그림 19에서 LC-1 하중조합의 경우 교대 높이가 4 m일 때 일체식 교대 교량 파일의 모멘트가 최소가 되고 이를 기점으로 모멘트가 증가함을 알 수 있으며, LC-2 하중조합의 경우 교대 높이가 5 m일 때 최소 모멘트를 보이지만 전반적으로 교대의 높이 변화에 대해서 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 따라서 대상교량의 파일에 작용하는 모멘트 측면에서 높이 5 m 이하의 교대를 대상으로 설계해야 합리적인 설계가 될 것으로 판단된다.

교대 높이에 따른 일체식 교대 교량 파일의 깊이별 변위(그림 20)를 통해 교대배면토압이 파일의 거동에 미치는 영향을 확인할 수 있다. LC-1 하중조합의 경우 교대 높이가 2~4 m일 때 파일 최상단의 변위는 (-)값으로, 상부구조의 팽창변위 방향으로 변위가 발생함을 확인할 수 있다. 하지만 5~6 m의 교대 높이에서는 파일 최상단의 변위가 (+)값으로, 상부구조 팽창변위의 반대방향으로 변위가 발생한다. 이는 교대배면토압의 영향으로, 교대 높이가 증가하면 온도변화에 의한 상부구조의 팽창변위보다 교대배면에 작

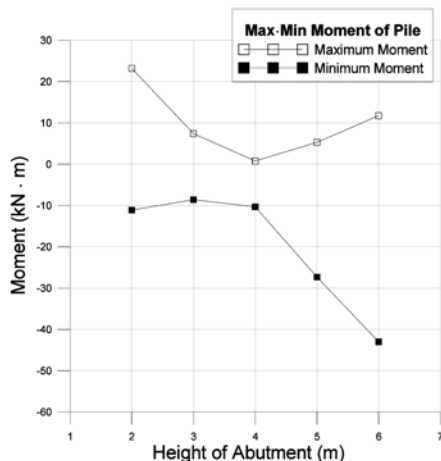


(a) LC-1 하중조합

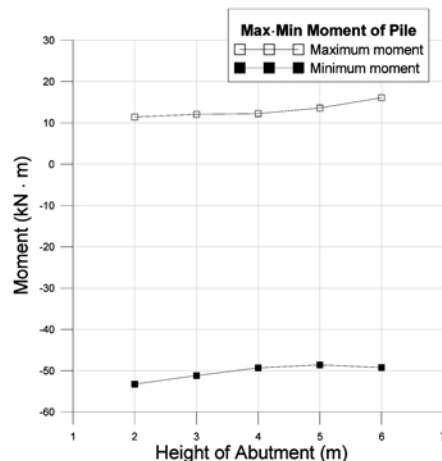


(b) LC-2 하중조합

그림 18. 교대 높이에 따른 일체식 교대 교량 상부구조의 최대·최소 모멘트



(a) LC-1 하중조합



(b) LC-2 하중조합

그림 19. 교대 높이에 따른 일체식 교대 교량 파일의 최대·최소 모멘트

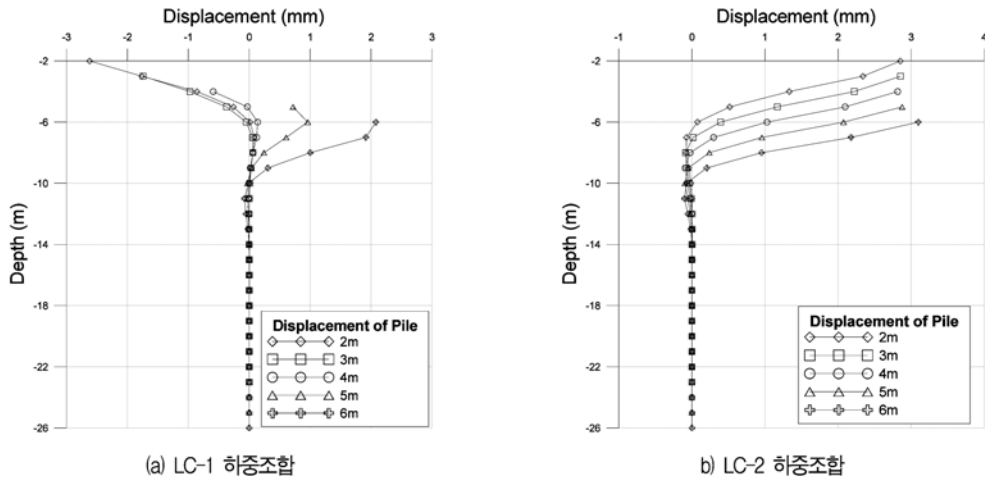


그림 20. 교대 높이에 따른 일체식 교대 교량 파일의 깊이별 변위

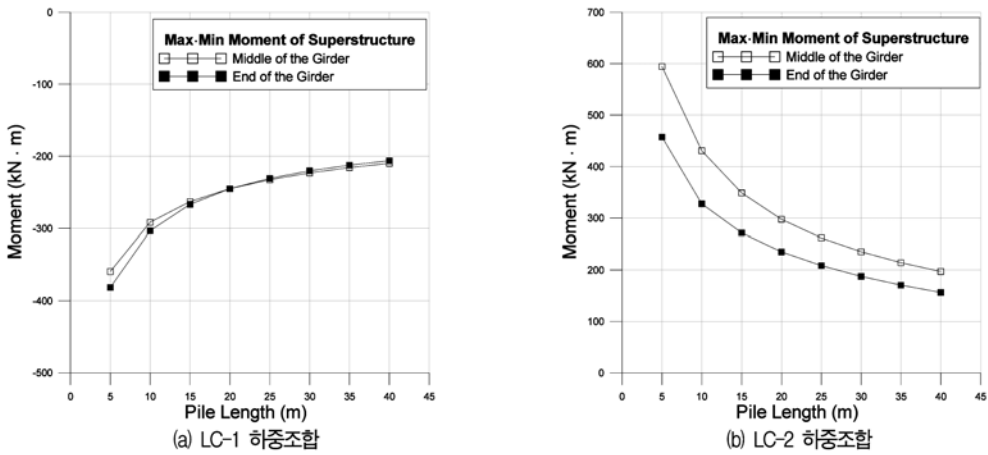


그림 21. 파일 길이에 따른 일체식 교대 교량 상부구조의 최대·최소 모멘트

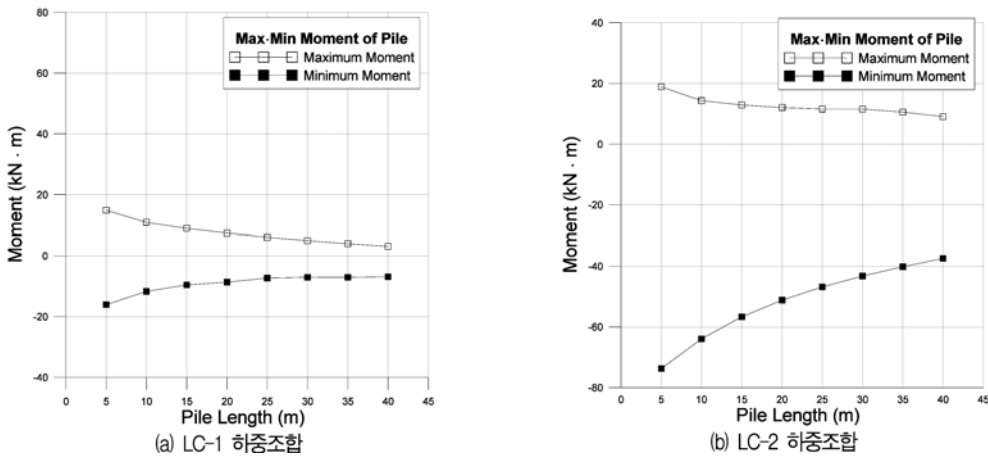
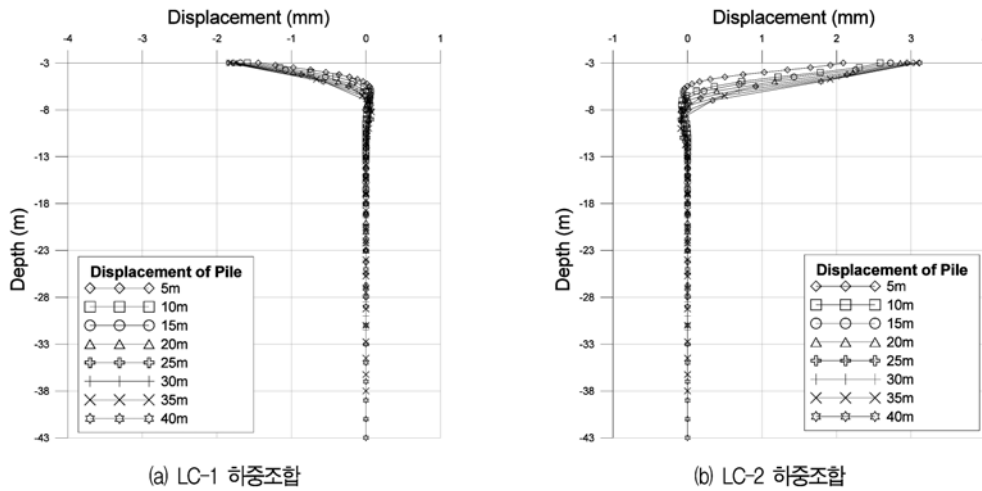


그림 22. 파일 길이에 따른 일체식 교대 교량 파일의 최대·최소 모멘트

용하는 수동토압에 의한 변위가 파일의 거동을 지배하였음을 의미한다. 반면에 LC-2 하중조합의 경우 교대 높이가 변화하여도 파일 최상단 변위의 변화는 크지 않으므로 교대 높이 변화에 따라 교대배면에 작용하는 수동토압은 수동토압만큼 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다. 그림 20을 통해, 파일 최상단의 변위 및 파일 전체에 발생하는 변위 측면에서 대상교량의 교대 높이가 4 m일 때 일체식 교대 교량으로써 유리한 거동을 보일 것으로 판단된다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이, 일체식 교대 교량의 설계 시에는 매개변수해석을 통하여 보다 합리적인 교대 높이를

결정할 필요가 있다.

3.3.3 파일 길이에 따른 일체식 교대 교량의 매개변수 해석  
파일 길이에 따른 일체식 교대 교량의 거동특성은 그림 21, 22, 23에서 LC-1, LC-2의 하중조합이 작용할 시 파일 길이에 따른 일체식 교대 교량 상부구조 및 파일의 최대·최소 모멘트, 파일의 깊이별 변위로 확인할 수 있다. 그림 21, 22를 통해서 LC-1, LC-2 하중조합에 대해 파일 길이가 증가할수록 상부구조에 작용하는 모멘트 및 파일에 작용하는 모멘트가 감소함을 알 수 있다. 이는 파일의 휨 강성과



(a) LC-1 하중조합 (b) LC-2 하중조합  
 그림 23. 파일 길이에 따른 일체식 교대 교량 파일의 깊이별 변위

관련이 있는 것으로, 파일 길이가 증가할수록 상부 및 하부 구조가 일체화된 일체식 교대 교량이 LC-1, LC-2 하중조합에 대해 유연한 라멘구조거동을 보이기 때문이라고 판단된다. 이러한 결과는 그림 23에서 파일 길이가 증가할수록 LC-1, LC-2 하중조합에 대한 파일 최상단의 변위가 증가함을 통해서도 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 파일의 유연한 거동이 일체식 교대 교량에 미치는 영향과 중요성을 확인할 수 있다. 따라서 일체식 교대 교량의 설계 및 시공 시 하부지반의 선단지지력, 지반강성 등을 고려하여 적절한 파일 종류와 길이를 선정하고, 선정된 파일을 구조해석에 적용하여 합리적인 설계가 되도록 해야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지반-파일 상호관계 모형화 방법에 따른 일체식 교대 교량의 거동비교를 통하여 합리적인 지반-파일 상호관계 모형화 방법을 제시하였으며, 제시된 모형화 방법을 적용한 매개변수 해석(매개변수: 파일 관입부 지반조건, 교대 높이, 파일 길이)을 통하여 일체식 교대 교량의 전반적인 거동특성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 지반-파일 상호관계 모형화에 따른 일체식 교대 교량 상부구조 및 파일의 거동 분석결과, 등가캔틸레버 파일 방법은 실제 파일의 거동을 표현하는데 제한이 될 것으로 사료되며 탄성지반스프링 방법이 모형화 및 설계 측면에서 보다 합리적인 방법이라고 판단된다.
2. 파일 관입부 지반조건에 따른 일체식 교대 교량의 매개변수 해석 결과, 지반강성이 증가할수록 상부구조에 작용하는 모멘트는 증가하고, 파일의 유연한 거동을 억제하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 온도변화에 의한 상부구조의 수축 및 팽창을 저항하는 성분으로 파일 관입부의 지반강성이 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.
3. 교대 높이에 따른 일체식 교대 교량의 매개변수 해석 결과, 교대 높이가 증가할수록 교대배면토압이 증가하여 상부구조 및 파일의 거동에 영향을 미침을 확인하였으며, 이를 통하여 크기가 작은 난쟁이교대가 일체식 교대 교량에

효과적인 교대형식임을 확인할 수 있다.

4. 파일 길이에 따른 일체식 교대 교량의 매개변수 해석 결과, 파일 길이가 증가할수록 상부구조 및 파일에 작용하는 모멘트가 감소하고 파일의 변위가 증가하는 등 대상교량이 유연한 라멘구조거동을 보임을 확인할 수 있다.
5. 일체식 교대 교량의 설계 및 시공 시에는 지반-파일 및 온도하중-교대배면토압 상호관계를 반영한 매개변수 해석을 통해 교대의 높이, 파일의 종류 및 규격 등을 선정해야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설교통 R&D 사업 중 스마트하이웨이 사업단과 교육과학기술부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

건설교통부(2005) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.  
 김상석(2004) 단경간 프리플렉스빔-교대 일체식 교량의 설계에 관한 연구, 석사학위논문, 홍익대학교 대학원.  
 남문석, 박영호(2007) 일체식 교대의 장기토압 거동, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제23권, 제4호, pp. 47~58.  
 남문석, 박영호, 김낙영, 육정훈(2006) 난쟁이 교대에 작용하는 수동토압, 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회, pp. 94-97.  
 박영호, 남문석(2007) 일체식 교대의 토압과 변위 거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권 제3C호, pp. 163-173.  
 박영호, 남문석, 김낙영, 조 희(2006) 난쟁이 교대의 토압과 변위 거동, 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회, pp. 57-60.  
 박영호, 정경자, 김성환(2000) 일체식 교량에 사용된 H 말뚝의 축방향 지지거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제3C호, pp. 281-290.  
 박영호, 정현식, 이영생, 정경자(2001) 일체식 교대에 사용된 타입 H-말뚝의 횡방향 지지거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제21권 제3C호, pp. 207-223.  
 장원석(2003) 프리플렉스빔-교대 일체식 교량의 거동에 관한 해석

적 연구, 석사학위논문, 홍익대학교.  
 한국도로공사 도로교통기술원(2005) PSC I 거더교의 최적설계 및 표준화 연구, 한국도로공사.  
 한국도로공사 도로교통연구원(2009) 일체식 교량 설계지침(무조인트 교량), 한국도로공사.  
 한국도로공사 도로연구소(1999) 무조인트교량 실용화 연구, 한국도로공사.  
 한국도로공사 도로연구소(2001) 계속에 의한 무조인트교량장기거동 해석 (II), 한국도로공사.  
 홍정희, 정재호, 박종면, 유성근, 윤순중(2002) 단경간 일체식교대 교량의 거동에 대한 해석적 연구, 한국전산구조공학회 2002 봄 학술발표회논문집, 한국전산구조공학회, pp. 99-106.  
 홍정희, 정재호, 유성근, 박종면, 윤순중(2002) 일체식교대 PSC 빔 교량의 거동에 관한 매개변수 해석, 한국전산구조공학회 2002년도 가을 학술발표회논문집, 한국전산구조공학회, pp. 412-419.  
 Abendroth, R.E., Lowell F. Greimann, L.F., and Ebner P.B. (1989) Abutment pile design for jointless bridges, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 11, pp. 2914-2929.  
 AISI (1996) *Integral Abutment for Steel Bridges*, Highway Structures Design Handbook, Vol. II, Chap. 5.  
 Dicleli, M. (2000) A Rational design approach for prestressed concrete girder integral bridges, *Engineering Structures*, Vol. 22, pp. 230-245.  
 Durbin, K.O. (2001) *Investigation of the Behavior of an Integral Abutment Bridge*, M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.  
 Greimann, L.F., Abendroth, R.E., Johnson, D.E., and Ebner, P.B. (1987) *Pile Design and Tests for Integral Abutment Bridges*, Final Report, Department of Civil Engineering, Engineering Research Institute, Iowa State University, Ames, Iowa.  
 PCI Publication (2001) *The State of Art of Precast/Prestressed Integral Bridges*, Precast/Prestressed Concrete Institute, IB-01.  
 Robert Frosch, Voraniti Chovichien, Katrina Durbin, David Fedroff (2006) *Jointless and Smoother Bridges: Behavior and Design of Piles*, Joint Transportation Research Program of Purdue University, Final Report.

(접수일: 2010.3.16/심사일: 2010.7.8/심사완료일: 2010.7.8)

## 기 호

- $A_g$  : 거더의 단면적  
 $A_s$  : 동일한 간격을 가지는 거더의 유효폭에 대한 바닥판의 단면적  
 $B$  : 휨 축에 대한 파일의 밑변길이

- $C_p$  : 파일의 등기조건에 따른 계수  
 $c_u$  : 비배수 전단 강도  
 $d$  : 상부구조의 최종팽창변위  
 $d_0$  : 상부구조의 자유팽창변위  
 $E_g$  : 거더 재료의 탄성계수  
 $E_m$  : 지반의 탄성계수  
 $E_{st}(z)$  : 파일 관입부 지반 p-y 곡선의 초기강성 또는 초기계수  
 $F_s$  : 일체식 교대 교량의 교대배면토압  
 $F_d$  : 교대배면토압에 의해 상부구조에 작용하는 축력  
 $h$  : 교대의 높이  
 $J$  : 사질토의 종류에 따라 결정되는 상수  
 $K$  : 수정된 수동토압계수, 실제 수동토압계수  
 $K_0$  : 정지토압계수  
 $K_a$  : 주동토압계수  
 $K_p$  : 수동토압계수  
 $k_d$  : 교량의 축방향 강성  
 $k(z)$  : 탄성지반스프링 방법에 적용되는 스프링 강성  
 $L_d$  : 교량의 경간장  
 $l_c$  : 파일머리부의 수평변위보다 매우 작은 변위(약 4%)를 보이는 파일의 캔틸레버 길이  
 $l_e$  : 파일의 등기캔틸레버 유효길이  
 $l_u$  : 지지되지 않은 부분의 파일길이  
 $M_{ax}$  : 최대모멘트  
 $M_{min}$  : 최소모멘트  
 $n$  : 거더 재료의 탄성계수에 대한 바닥판 재료의 탄성계수 비  
 $p_u$  : 극한지반저항  
 $s$  : 스프링 간격  
 $w_s$  : 이상화된 교량의 유효폭  
 $y_{50}$  : 극한지반저항의 1/2에 대한 변위  
 $z$  : 지표면으로부터의 깊이  
 $\alpha$  : 상부구조의 선폽창계수  
 $\gamma$  : 평균유효단위중량  
 $\gamma_s$  : 교대 뒤채움재의 단위중량  
 $\delta T$  : 온도변화량  
 $\varepsilon_{50}$  : 최대 응력의 1/2에 해당하는 축방향 변형률  
 $\phi$  : 내부마찰각  
 $\varphi$  : 수평변위와 토압계수 사이의 선형관계의 기울기