



## 프리스트레스트 콘크리트 거더 일체식 교량의 교대 거동 해석과 예측

김우석<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 토목공학과

### Analysis and Prediction for Abutment Behavior of Prestressed Concrete Girder Integral Abutment Bridges

WooSeok Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**ABSTRACT** This paper discusses the analysis method of prestressed concrete girder integral abutment bridges for a 75-year bridge life and the development of prediction models for abutment displacements under thermal loading due to annual temperature fluctuation and time-dependent loading. The developed nonlinear numerical modeling methodologies considered soil-structure interaction between supporting piles and surrounding soils and between abutment and backfills. Material nonlinearity was also considered to simulate differential rotation in construction joints between abutment and backwall. Based on the numerical modeling methodologies, a parametric study of 243 analysis cases, considering five parameters: (1) thermal expansion coefficient, (2) bridge length, (3) backfill height, (4) backfill stiffness, and (5) pile soil stiffness, was performed to established prediction models for abutment displacements over a bridge life. The parametric study results revealed that thermal expansion coefficient, bridge length, and pile-soil stiffness significantly influenced the abutment displacement. Bridge length parameter significantly influenced the abutment top displacement at the centroid of the superstructure, which is similar to the free expansion analysis results. Developed prediction model can be used for a preliminary design of integral abutment bridges.

**Keywords :** integral abutment, bridge, thermal load, time-dependent, soil-structure interaction

#### 1. 서 론

일체식 교량(integral abutment bridge)은 신축이음을 생략하고 상부 구조물과 하부 구조물을 일체식으로 콘크리트를 타설한 형태이며, 주로 약축 방향으로 향타된 H-말뚝으로 지지된다. 전 세계적으로 많은 일체식 교량이 시공되었으며 계속적으로 그 시공 사례가 증가하고 있으며, 특히 미국에서는 대부분의 주정부에서 중·단시간 교량에 대해 일체식 교량의 시공을 권장하고 있다.

일체식 교량 교대의 거동은 신축이음이 없고 상부 구조와 하부 구조가 일체식으로 연결되는 구조 특성상 온도하중, 지반과 구조물의 상호작용, 그리고 지반과 뒤택움재의 비선형 거동에 복합적으로 영향을 받는다. 특히 PSC(prestressed concrete) 거더를 사용한 일체식 교량의 경우 콘크리트의 시간 의존적 특성(time-dependent effect)이 교대의 거동에 커다란 영향을 미친다.

지금까지의 연구는 주로 설계온도를 정적인 하중으로

제하하는 해석 방법을 사용하고 콘크리트의 시간 의존 영향을 고려하지 않는 방법으로 일체식 교량의 거동을 분석해 왔다.<sup>1,4)</sup> 하지만, 실제의 구조물은 시간 이력에 따라 온도하중의 변화와 구조물-지반의 상호작용, 그리고 콘크리트의 시간 의존 영향이 동시에 작용하고 이러한 영향은 일체식 교량 교대에 비가역적인(irreversible) 변위를 일으킨다.<sup>5)</sup> 또한, 이러한 거동을 보이는 일체식 교량에 대한 구체적인 설계 기준 역시 부족한 실정이다.<sup>6,7,15)</sup>

따라서 이 연구에서는 구조물의 시공 이후 시간 이력에 따른 온도의 변화와 콘크리트의 물성 변화 및 시간 의존적 특성, 그리고 온도 경사 하중(temperature gradient)을 구조물-지반 상호작용과 재료와 지반의 비선형 이력(hysteretic) 거동, 즉 경로 의존(path dependent) 거동을 나타낼 수 있는 수치 해석 모델을 적용하여 일체식 교량을 해석할 수 있는 방법을 개발하였다.<sup>5)</sup> 개발된 방법은 4개의 일체식 교량을 시공 단계부터 7년간의 장기 모니터링한 결과<sup>8)</sup>와 비교하여 검증하였다. 또한, 제안된 모델을 바탕으로 변수 해석(parametric study)을 수행하여 교대 변위 예측모델을 확립하였다. 예측 모델의 제시를 위하여 모두 243가지의 경우 수가 사용되었으며, 고려된 변수는 다음과 같다: (1) 열팽창 계수, (2) 교량 길이, (3) 뒤택움재의 높이,

\*Corresponding author E-mail: wooseok@cnu.ac.kr

Received May 31, 2011, Revised August 9, 2011,

Accepted August 16, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

(4) 뒤채움재의 강성, 그리고 (5) 말뚝-지반의 강성.

제안된 예측모델은 교대의 하단부의 변위를 예측하는 모델과 교대의 상부, 즉 교량 상부의 도심에서의 변위를 예측하는 모델로 구성되었으며, 각각 현재 일체식 교량의 설계에 사용되고 있는 자유팽창·수축의 값과 비교하여 현재의 설계 기준의 정확도를 평가하였다.

## 2. 일체식 교량의 수치 해석 모델

시간 이력에 따른 일체식 교량의 교대 거동을 분석하기 위해 다음과 같은 수치 해석 모델을 구성하였다. 해석 모델은 교대-뒤채움재의 상호작용, 말뚝-지반의 상호작용, 교대-뒷벽의 시공 연결부(backwall-abutment construction joint)를 고려할 수 있도록 작성되었다. 교량에 작용하는 하중(변형)으로는 배면 토압, 콘크리트 크리프, 콘크리트 수축, 긴장재의 릴렉세이션, 온도 하중과 온도 경사 하중이 고려되었다. 이 연구에서 사용된 수치 해석 모델에 대한 상세한 내용은 Kim and Laman<sup>5)</sup>에 설명되어 있고, 중요 내용은 다음의 요약과 같다.

### 2.1 모델 요소

다음의 Fig. 1에 나타난 것과 같이 2차원의 수치 해석 모델을 구성하였고, 해석 대상 구조물의 대칭을 이용하여 1/2 모델을 적용하였다. 교량의 단면은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 4개의 PSC 거터를 사용하였다.

#### 2.1.1 콘크리트 재료

콘크리트 재료와 뒤채움재 그리고 지반 토양의 특성은

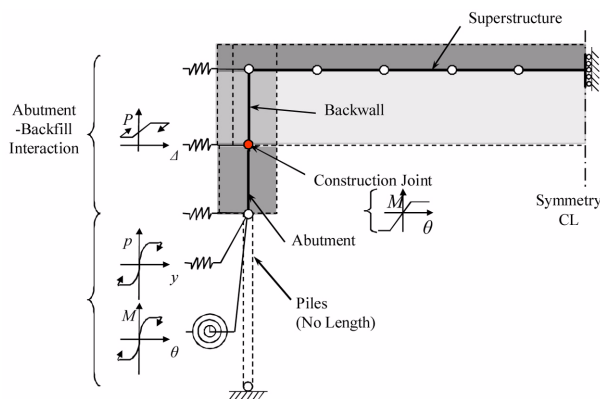


Fig. 1 Schematic of numerical model

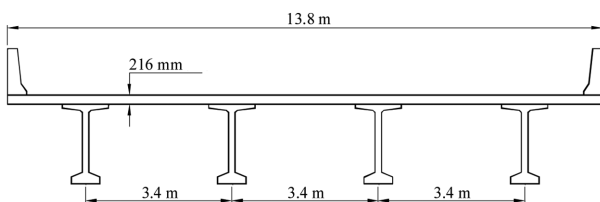


Fig. 2 Typical section for numerical models

Table 1 Bridge materials

| Material          | Strength ( $f_c'$ or $F_y$ ) (MPa) | Elastic modulus (MPa) | Thermal expansion coefficient (mm/mm/°C) |
|-------------------|------------------------------------|-----------------------|--|
| PSC girder        | 55.2                               | 35,536                | 9.0E-6                                   |
| Deck and backwall | 27.6                               | 25,124                | 9.0E-6                                   |
| Abutment          | 20.7                               | 21,760                | 9.0E-6                                   |
| Steel H-piles     | 345                                | 200,000               | 13E-6                                    |

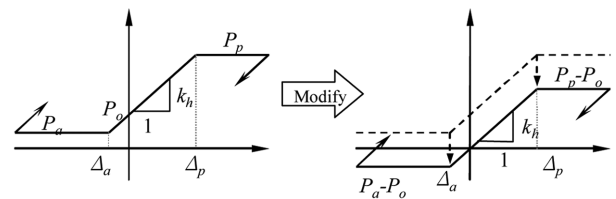
실제 건설된 교량들의 측정값이 사용되었다.<sup>9)</sup> 사용된 교량의 콘크리트 강도 및 특성은 Table 1에 나타내었다.

#### 2.1.2 교량 모델링

이 연구에서는 75년간의 AASHTO 설계 연한을 시물레이션을 하기 위하여 2차원의 모델을 적용하였다. 콘크리트의 시간 의존 영향과 지반-구조물의 상호작용으로 인해 교량은 시간에 따라 비선형, 비가역 변형이 발생하게 된다. 따라서 시간 이력 해석법을 사용하여 일체식 교량의 교대에 대한 변위 변화와 그 최대/최소값을 추정하였고, 이에 대한 모델을 제안하였다.

지반-구조물 상호작용을 고려하기 위해 교대-뒤채움재의 거동은 Rankine의 주동/수동 토압을 적용하였다. 실제 수치 해석 모델에는 Fig. 3의 수정된 모델을 적용하였다. 말뚝-지반 상호작용은 API<sup>10)</sup>에 의해 제안된 말뚝의 횡지력식이 사용되었다.

교대와 뒷벽의 연결부의 철근은 대체로 ACI에 의해 요구되는 최소 철근 양의 약 25% 정도의 굵힘 강도를 나타내므로 교량 상부의 온도 변화 움직임에 대하여 미소 회전 변위를 유발한다(Fig. 4). 따라서 이 부분의 연결부



(a) Typical earth pressure model (b) Modified earth pressure model

Fig. 3 Abutment-backfill numerical implementation Modification

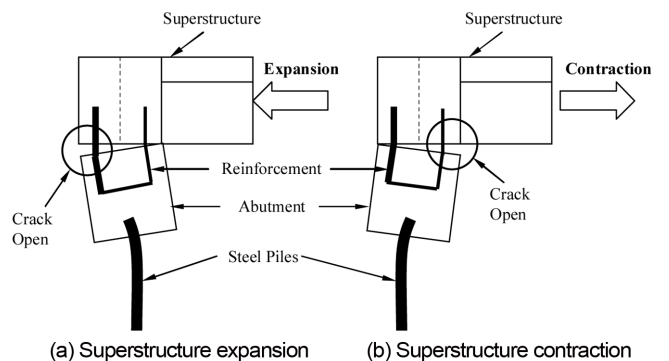


Fig. 4 Construction joint reinforcement and behavior

는 모멘트-곡률의 관계식을 유도하여 정의하였다.

## 2.2 하중

이 연구에서는 교량 상부의 온도하중, 온도경사하중, 콘크리트의 시간 의존 영향, 그리고 뒤펀재의 배면토압이 고려되었다. 고려된 시간 의존 영향은 ACI-209<sup>11)</sup>에 기초한 콘크리트의 크리프와 건조수축 그리고 AASHTO LRFD<sup>6)</sup>에 기초한 긴장재의 릴렉сей션이 고려되었다.

교량 구조물은 주로 대기온도의 영향을 크게 받으며, 대기온도의 변화는 상부 구조물의 온도와 대부분 일치하며 상당한 영향을 미친다.<sup>1,8)</sup> 따라서 이 연구에서는 상부 구조물의 온도 변화를 7일 평균 대기 온도를 이용하여 다음의 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$T(t) = T_m + A \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

여기서,  $T_m$  = 연평균 기온,  $A$  = 연온도 진폭,  $\omega$  = 빈도( $2\pi$ ),  $t$  = 해석시간(년) 그리고,  $\theta$  = 위상지연( $-\pi$ ).

온도경사하중 또한 기 연구 결과<sup>1)</sup>에 의하면 일체식 교량의 거동에 많은 영향을 미치므로 AASHTO LRFD<sup>6)</sup>에 의한 비선형 온도경사모형을 동일한 축력과 모멘트를 나타낼 수 있는 선형 모형으로 단순화시켜 적용하였다.

콘크리트의 크리프는 ACI-209<sup>11)</sup>와 재령보정 탄성계수 법(age-adjusted elastic modulus method 이하 AEMM)을 적용하여 모델에 적용하였다. 검증 모델에 사용된 교량의 크리프 계수와 재령보정 계수는 각각 Figs. 5와 6에 나타내었다. 콘크리트의 건조수축 현상 또한 ACI-209에 의해 고려되었으며, 검증 모델에 사용된 건조수축계수는 Fig. 7

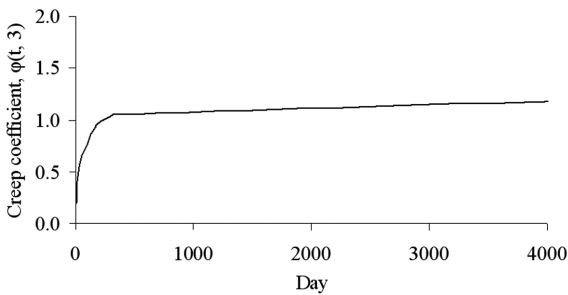


Fig. 5 Creep coefficient

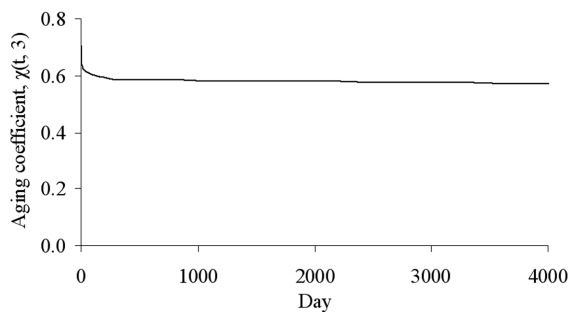


Fig. 6 Aging coefficient

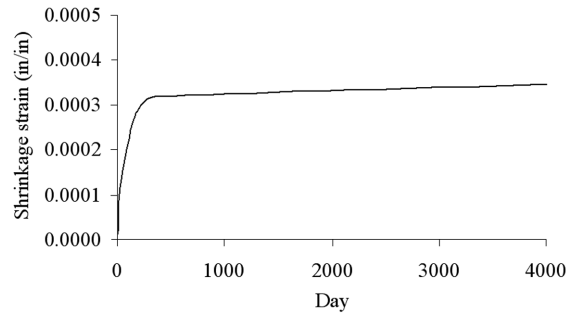


Fig. 7 Shrinkage coefficient

에 나타나 있다. 기본 AEMM 방정식은 다음과 같다.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} [1 + \phi(t, t_0)] + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_0)}{\bar{E}(t, t_0)} + \varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) \quad (2a)$$

여기서,

$$\bar{E}(t, t_0) = \frac{E(t_0)}{1 + \chi(t, t_0)\phi(t, t_0)} \quad (2b)$$

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.60}}{10 + (t - t_0)^{0.60}} (2.35\gamma_c) \quad (2c)$$

여기서,  $E(t_0)$ 는 콘크리트의 최초 탄성계수,  $\bar{E}(t, t_0)$ 는 콘크리트의 재령보정 유효 탄성계수,  $\sigma(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 응력,  $\phi(t, t_0)$ 와  $\chi(t, t_0)$ 는 각각 최초 재하 시점  $t_0$ 에 대응하는 시간  $t$ 에서의 크리프 계수와 재령보정계수, 그리고  $\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0})$ 는 시간  $t$ 에서의 건조수축 변위,  $\gamma_c$ 는 보정계수이다.  $\chi(t, t_0)$ 는 ACI-209에서 주어진 표(Table 5.1.1)를 이용하였다.

해석을 수행한 결과, 교량 상부구조의 상단과 하단에서의 변형률은 교량 지간에 대한 위치와 시간에 따라서 Figs. 8과 9와 같이 나타났다. 해석에 사용된 교량은 거더 가설 후 174일째에 바닥판 콘크리트가 현장 타설되는 것을 가정하였기 때문에, Fig. 10과 같이 174일 이후에 변형이 증가하는 경향을 보였다.

동일한 교량을 현재의 일체식 교량 설계 시에 사용되는 정적하중 모델 해석 방법(+16.7°C 또는 -22.2°C)과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에 나타난 바와 같

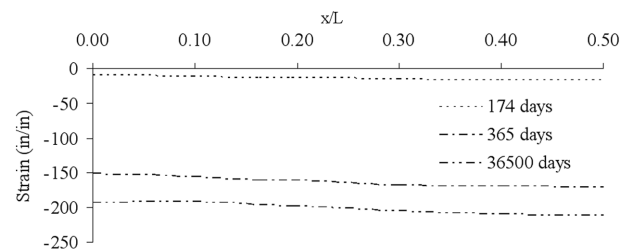


Fig. 8 Strain at top fiber

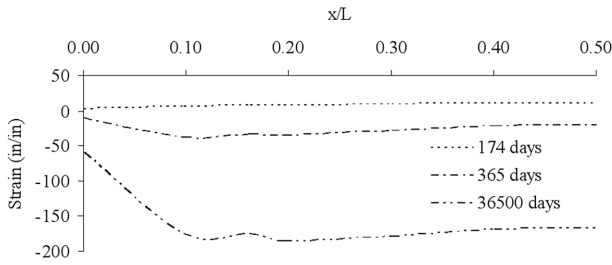


Fig. 9 Strain at bottom fiber

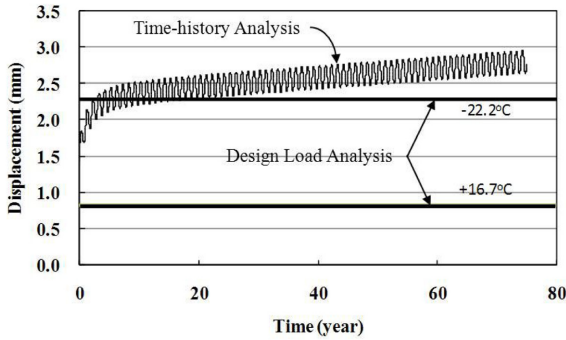


Fig. 10 Abutment displacement based on time-history analysis and static analysis (+: away from backfill)

이 시간 의존 영향을 고려하지 않는 정적 설계 하중 해석 (design load analysis)에 의한 교대 변위는 시간 의존 영향을 고려한 이 연구의 시간 이력 해석(time-history analysis)에 의한 결과와 큰 차이를 나타냈다.

### 3. IAB 교대 변위 예측 모델

앞 절에서 설명된 수치 해석 모델을 이용하여 다양한 변수 해석을 실시하였으며, 해석 및 연구 결과를 토대로 75년간의 교대 변위를 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.

#### 3.1 결정 변수

결정 변수의 선택과 변수의 범위는 이전의 문헌 조사, 장기 모니터링<sup>8,9)</sup>과 수치 해석 연구<sup>5)</sup>를 통하여 Table 2와 같이 결정되었다.

열팽창계수와 교량의 길이는 AASHTO LRFD<sup>6)</sup>에 언급되었듯이 일체식 교량의 거동에 가장 영향을 많이 미치

Table 2 Parameters and values definition

| Thermal expansion coefficient ( $\alpha$ ) ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | Total bridge length ( $L$ ) (m) | Backfill height ( $H$ ) (m) | Backfill stiffness ( $B$ )* | Pile soil stiffness ( $P$ )** |
|--|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 5.4  | 18.3                            | 3.0                         | High                        | High                          |
| 9.9  | 61.0                            | 4.6                         | intermediate                | intermediate                  |
| 14.4   | 121.9                           | 6.1                         | low                         | low                           |

\*Based on Table 3

\*\*Based on Table 4

는 요소이다. Dicleli and Albhaisi<sup>2)</sup>는 말뚝-지반의 상호작용에 의한 횡강성이 일체식 교량의 거동의 중요한 요소임을 보였고, Dicleli and Albhaisi와 박영호와 남문석<sup>3)</sup>은 뒤택움재와 뒤택움재의 강성이 일체식 교량의 거동을 결정하는 중요한 요소임을 밝혔다. 뒤택움재와 말뚝 주변의 지반은 흙의 공학적 물성치와 많은 연관관계가 있으므로 이 연구의 변수 연구에서는 이러한 성질들 또한 고려되었다.

#### 3.1.1 열팽창 계수

교량 상부 구조의 온도변화에 대한 변형률은 열팽창 계수( $\alpha$ )에 의해 결정된다. 열팽창 계수의 값은 콘크리트의 배합설계, 자갈의 종류와 크기, 물-시멘트 비, 습도, 콘크리트의 재령 등 여러 가지의 영향을 받는다. AASHTO LRFD<sup>6)</sup>에서는 열팽창 계수의 값을  $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 그리고 범위를  $5.4 \sim 14.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 제안하고 있고, Oesterle 등<sup>12)</sup>은 표본 조사를 통해 평균  $8.77 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 와 범위로  $4.1 \sim 14.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 제안하고 있다.

따라서, 이 연구에서는 AASHTO LRFD의 범위와 기존 연구들의 평균치를 이용하여 최소, 평균, 최대값을 각각  $5.4, 9.9, 14.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 하였다.

#### 3.1.2 교량 길이와 뒤택움재의 높이

두 가지의 교량 치수가 변수 연구에 사용되었다: 교량의 길이  $L$ 과 뒤택움재의 높이  $H$ . 현재 미국의 각 주정부의 도로교통청들이 적용하고 있는 최대 길이가 서로 다르므로,<sup>13)</sup> 시간이 짧은 교량과 중간 정도의 교량을 고려하여 18.3, 61.0, 121.9 m의 교량 길이를 변수해석에 사용하였다.

대부분의 일체식 교량들은 뒤택움재의 배면토압을 낮추기 위해 스텐브(stub) 교대를 사용하고 있다.<sup>13)</sup> 따라서 실제 배면토압에 직접적인 영향을 주는 뒤택움재의 높이를 해석 변수로 하였다. 낮은 높이부터 중간 높이(3.0~6.1 m)를 고려하여 3.0, 4.6, 6.1 m의 뒤택움재 높이가 변수 해석에 사용되었다.

#### 3.1.3 뒤택움재의 강성

뒤택움재의 강성과 지반계수는 Table 3에 나타난 것과 같이 Laman et al.<sup>9)</sup>의 실험 결과와 Kim and Laman<sup>14)</sup>의 분석을 토대로 산정하였다.

Table 3 Backfill properties and stiffness

| Property  | Intermediate $B = 2$ | High $B = 3$ | Low $B = 1$ |
|---|----------------------|--------------|-------------|
| Density ( $\gamma$ ) ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )       | 18.7                 | 19.3         | 18.2        |
| Angle of friction ( $\phi_f$ ) (Degree)               | 34                   | 37.4         | 30.6        |
| Subgrade modulus ( $K_h$ ) ( $\text{MN}/\text{m}^3$ ) | 12                   | 18           | 6           |

### 3.1.4 말뚝-지반의 강성

말뚝과 지반의 상호작용을 고려한 강성은 말뚝의 강성과 교량하부의 지반의 강성과 관계가 있으므로 다양한 경우의 수를 가진다. 이 연구에서는 교량의 길이와 뒤택움재의 높이 그리고 길어깨를 포함한 3차선의 차로를 고려하여 11개의 약축(weak-axis orientation)으로 향타된 HP310×110의 말뚝 기초를 항복응력 345 MPa를 적용하여 변수해석의 기본 모델로 삼았다.

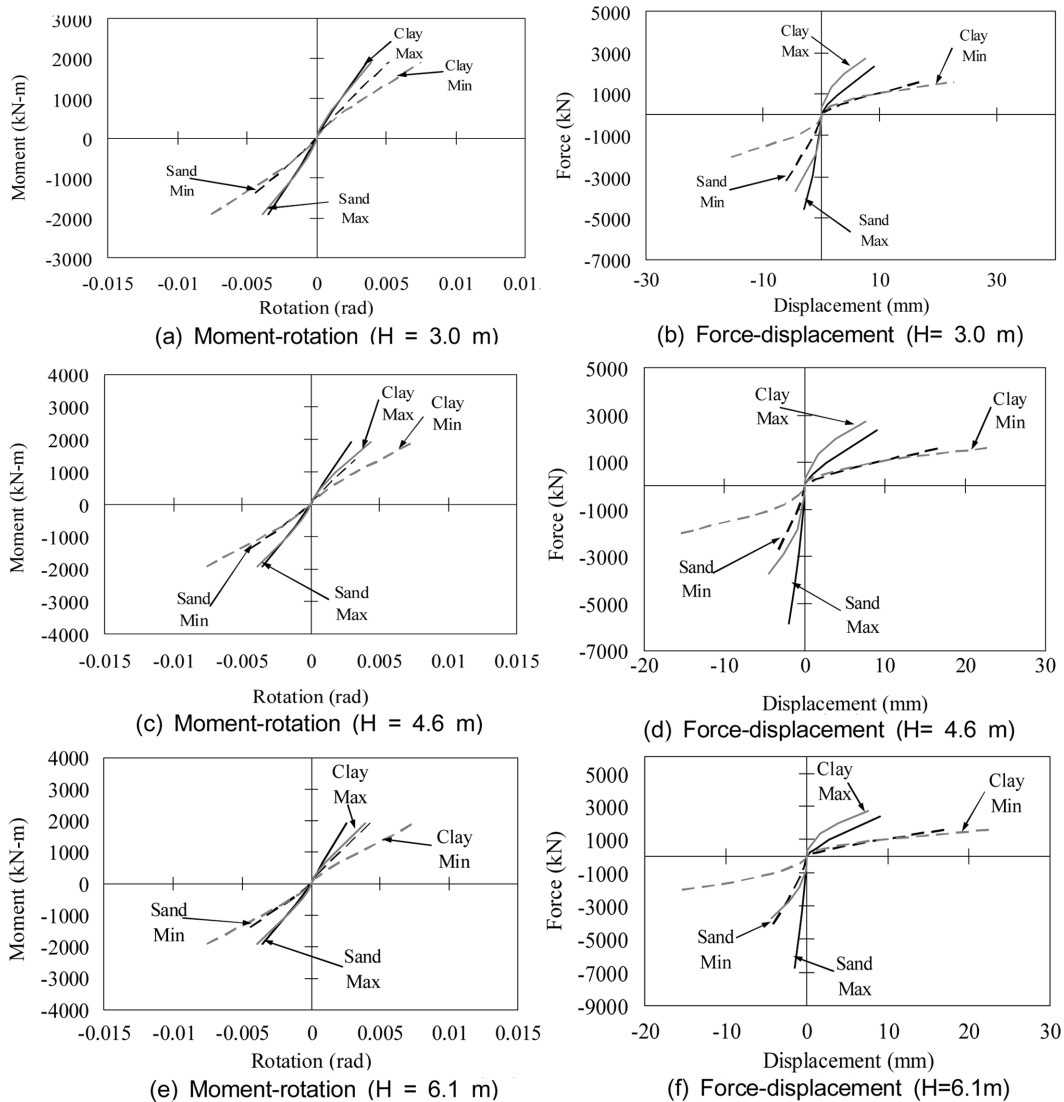
실험적, 해석적으로 일체식 교량의 지지말뚝 거동에 관한 기존 연구<sup>19)</sup>에 의하면 말뚝은 지표면으로부터 약 3.0에서 4.6m의 깊이에서 고정점(fixity point)을 가진다. 따라서 선택된 교량의 길이와 교대의 높이를 고려하여 이 연구에서는 모든 말뚝의 길이는 7.6m로 가정되었고, 기반암에서의 경계조건은 모든 자유도가 구속되는 것으로 가정하였다. 또한, 교대 앞쪽의 지반과 달리 뒤택움재의 밑에 있는 교대의 뒤택 지반은 뒤택움재의 높이에 따른 과하중(overburden pressure)이 고려되었다. 변수 연구를 위한 지반의 강성의 범위를 결정하기 위해 이 연구에서는

**Table 4** Soil layer properties and pile-soil stiffness

| Property   | Intermediate<br>$P=2$ | High<br>$P=3$ | Low<br>$P=1$ |
|--|-----------------------|---------------|--------------|
| Sand density ( $\text{kN/m}^3$ )                       | 19                    | 22            | 16           |
| Clay density ( $\text{kN/m}^3$ )                       | 19                    | 22            | 16           |
| Angle of friction (sand)<br>(degree)                   | 35                    | 42            | 28           |
| Undrained shear strength (clay)<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 121                   | 193           | 48           |
| Elastic modulus ( $\text{MN/m}^3$ )                    | 271                   | 353           | 190          |
| $\epsilon_{50}$ (mm)                                   | 0.20                  | 0.13          | 0.25         |

각각의 지반 물성치의 조합이 나타낼 수 있는 점성토의 최대값과 최소값, 비점성토의 최대값과 최소값을 고려하였고 이들의 값들은 Table 4에 나타내었다.

Fig. 11에 나타낸 것과 같이 뒤택움재의 높이 변화에 따른 말뚝-지반의 강성을 힘-변형과 모멘트-회전각으로 나타내었다. 이러한 방법으로 뒤택움재의 종류와 높이에



**Fig. 11** Pile-soil stiffness

따른 말뚝-지반의 강성의 최대값과 최소값 그리고 이들의 중간 값을 찾아내어 변수 연구의 수치 해석 모델에 사용되었다.

#### 4. 결과 토의

모두 243가지 경우에 대하여 변수 연구를 실시하여 교대의 변위에 관한 영향을 조사하였다. 교량은 시간에 따른 온도변화에 의해 수축(교대 변위 증가)과 인장(교대 변위 감소)을 반복하며, 시간 의존 영향에 의해 점차 수축하는 경향을 보인다. 또한, 이로 인해 교량 상부의 축력과 모멘트의 변화도 예상된다. 따라서 교량 상부 구조물의 거동과 지반-구조물의 상호작용으로 인해 교대의 변위는 Fig. 10과 같이 계속적으로 증가하는(뒤채움재로부터 멀어지는, 또는 교량상부의 수축) 경향을 나타낸다. 변수 연구 결과로부터 각각의 경우의 최대 교대 변위를 회귀 분석하여, 다음의 최대 교대 변위( $u_{max}$ )를 추정하는 식을 유도하였다. 식을 유도하는 과정에 결정 변수의 영향값이 작은 경우에는 식의 간략화를 위해 제외하였다.

$$\text{for } H \leq 3.8 \text{ m, } u_{max} = 0.04\alpha^{0.3}L^{1.2}P^{-0.06} \quad (3)$$

$$\text{for } 3.8 < H \leq 5.4 \text{ m, } u_{max} = 0.03\alpha^{0.7}L^{1.0}P^{-0.1} \quad (4)$$

$$\text{for } H > 5.4 \text{ m, } u_{max} = 5.3\alpha^{0.3}P^{-1.0} \quad (5)$$

여기서,

$\alpha$  = 열팽창 계수(mm/mm<sup>°C</sup>) × 1E + 6,

L = 교량 길이(m),

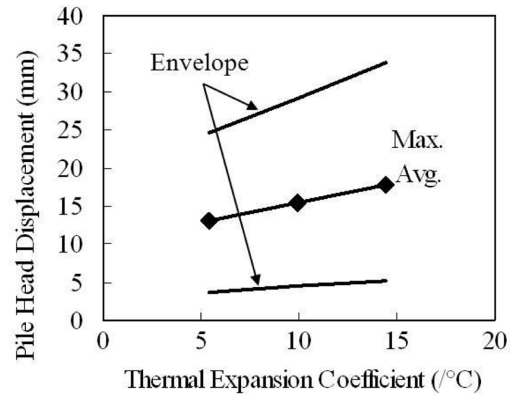
H = 뒤채움재의 높이(m)

P = Table 4의 말뚝-지반 강성(low = 1, intermediate = 2, high = 3 from Table 4)

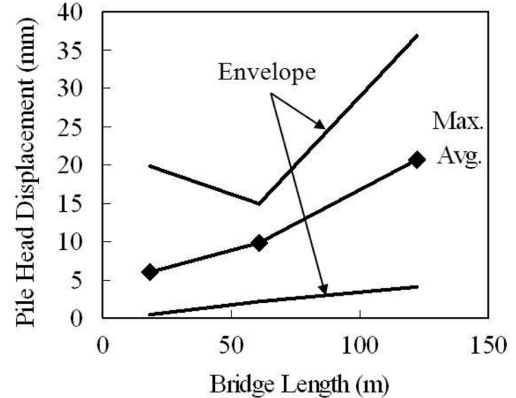
위의 식 (3)~(5)에서 나타나듯이 일체식 교대의 변위에는 열팽창 계수, 교량의 길이, 그리고 말뚝-지반의 강성이 지배적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한, 변수 연구의 결과를 토대로 이 세 가지 변수에 대하여 교대 최대 변위의 평균값(max. avg.)과 이들의 한계 값들(envelope)을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 나타내었듯이, 교대 하부(말뚝 두부)의 변위는 열팽창 계수와 교량 길이에 비례하고 지반 강성에 반비례한다는 것을 알 수 있었다.

수치 해석 모델을 활용한 변수 연구의 결과와 기존의 설계 방법인 교량 상부의 자유팽창·수축에 의한 교대의 변위 결과를 교대의 하부와 상부에서 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)에 나타난 것과 같이 교량 상부 거동의 영향이 직접적인 교대의 상부의 변위는 두 해석 방법 모두 유사한 경향을 보이지만, 시간의존영향으로 인해 이 연구에 의한 교대 변위가 자유팽창·수축에 의한 변위 보다는 항상 크게 나타났다.

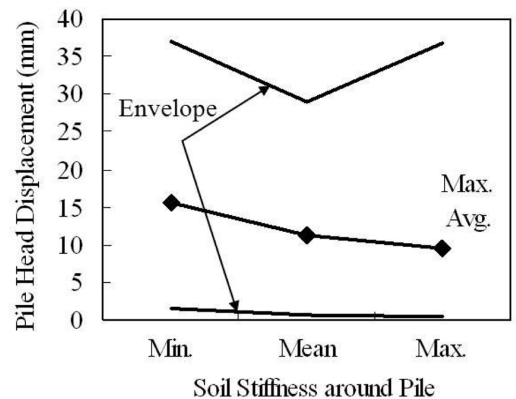
Fig. 13(b)에 나타난 것과 같이 말뚝-지반의 상호작용



(a) Displacement vs. backfill height



(b) Displacement vs. bridge length



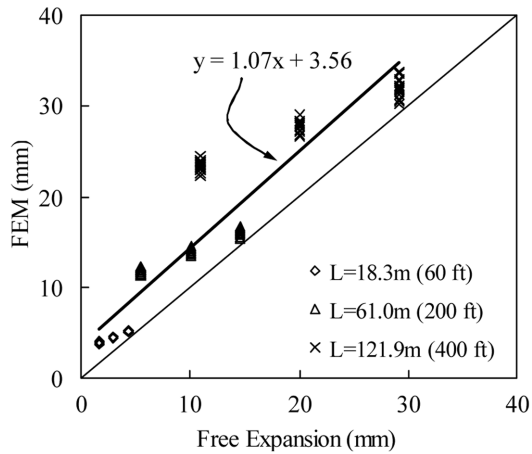
(c) Displacement vs. pile-soil stiffness

Fig. 12 Pile head displacement

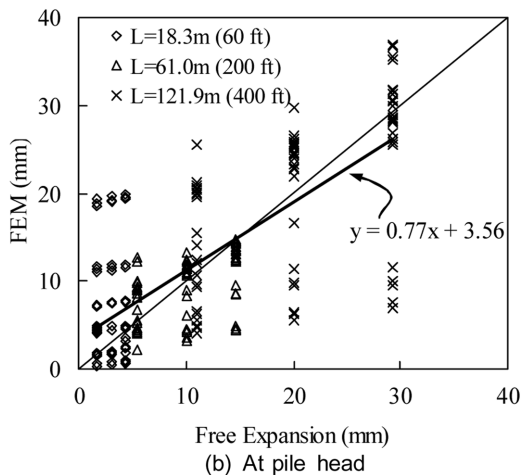
영향이 큰 교대 하부의 변위는 자유팽창·수축에 의한 추정법으로는 이 연구에 의한 추정법과 비교할 때 상당한 오차가 나타났다. 또한, Fig. 13(a)와 (b)를 비교함으로써 교대에는 항상 회전변위가 생기는 것을 알 수 있다.

그러므로 이들의 결과로부터 교량 교대는 기울어짐이 항상 발생하는 것을 알 수 있고, 교량이 길어질수록, 말뚝-지반의 강성이 증가할수록 교대의 회전변위는 증가하고 이로 인한 말뚝에 가해지는 모멘트도 증가하는 것을 예측할 수 있다. 또한, 교대 거동에 대한 배면토압의 영향도 시간의존영향에 의한 교량상부의 수축변위에 의해 감소할 것으로 기대된다.

기초 설계 시 미리 말뚝에 요구되는 변위의 양을 추정할 수 있도록 뒤채움재의 높이에 대한 말뚝 변위 도표



(a) At centroid of superstructure



(b) At pile head

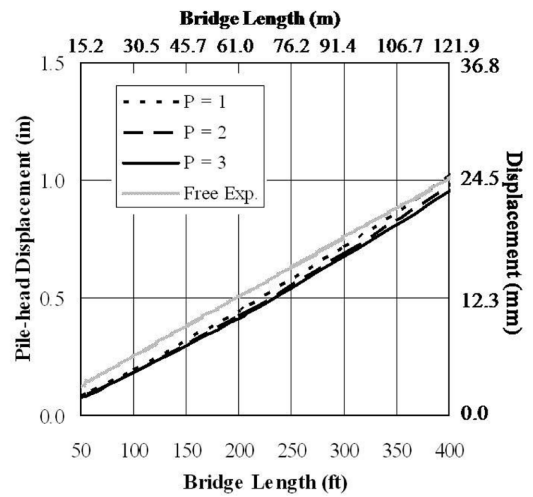
Fig. 13 Abutment displacement comparison

를 작성하여 Fig. 14에 나타내었다. 해석은 AASHTO LRFD<sup>6)</sup>에서 추천한 콘크리트의 열팽창계수의 추천 값인  $\alpha = 10.8 \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ 와 Table 3에서 뒤채움재의 강성이 중간 값(intermediate)을 가지는 경우를 가정하였다. 현재의 설계기준인 자유팽창·수축과의 비교를 위해 자유팽창·수축의 교대 변위 또한 그림에 포함되었다. 이 자유팽창·수축은 열팽창계수  $\alpha = 10.8 \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ 와  $40^\circ\text{C}$  온도 변화를 가정하였다.

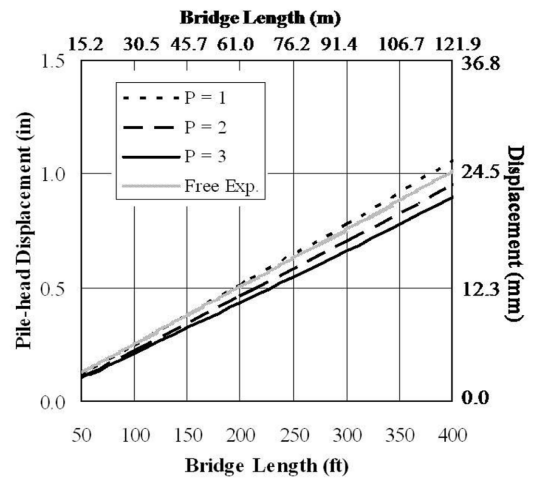
## 5. 결 론

이 연구에서는 새로운 방식의 일체식 교량 수치 해석 방법을 제안하였고, 이 방법을 이용한 변수 연구를 통하여 일체식 교대 교량의 교대 변위를 예측하는 모델을 제시하였다. 이 연구에서 기존의 설계 온도하중을 이용한 정적 해석 방식을 탈피하여 시간에 따른 교량의 거동 변화를 온도 변화와 콘크리트의 시간 의존 영향을 고려하여 모델링 하였으며, 제안된 방법으로 교량의 수명기간 동안의 교량 거동을 예측·분석하였다. 이 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

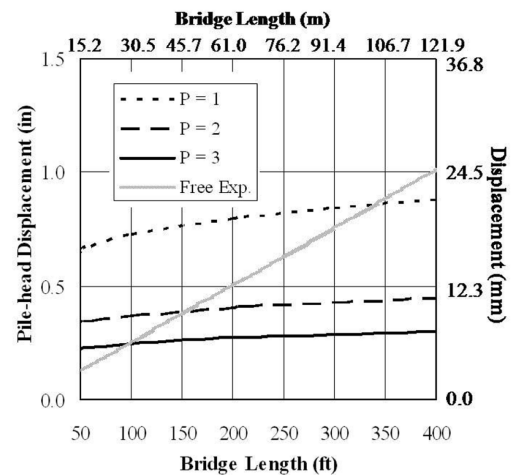
- 1) 고려된 5가지의 결정 변수(열팽창 계수, 교량 길이, 뒤채움재의 높이, 뒤채움재의 강성, 말뚝-지반의 강



(a) Backfill height (H) = 3.0 m



(b) Backfill height (H) = 4.6 m



(c) Backfill height (H) = 6.1 m

Fig. 14 Maximum pile head displacement

성) 중 열팽창 계수, 교량의 길이, 그리고 말뚝-지반의 강성이 다른 변수들에 비하여 교대의 변위에 지배적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히, 시간의존 영향을 고려하여 설계를 할 경우 기존 연구에 비하여 교대의 변위가 증가(뒤채움재로부터 멀어지는 변

- 위)하여 뒤편재의 배면토압의 영향이 감소할 것으로 기대된다. 또한, 현재 설계 시 이용되는 자유팽창·수축에 의한 변위 추정법보다 교대의 변위를 정확하게 추정할 수 있을 것으로 기대된다.
- 2) 교대의 상부 변위는 교량 상부의 자유팽창·수축에 의한 변위와 비교하여 시간 의존 영향으로 인해 다소 큰 값을 가지며 열팽창계수와 교량의 길이에 비례하고 지반 강성에 반비례하였다. 교대 하부 또는 말뚝 두부의 변위는 교량의 상부의 영향에 다른 결정 변수들의 영향이 더해져 이 연구 결과와 비교할 때 기존의 자유팽창·수축에 의한 변위 추정 결과와 정적해석에 의한 결과는 큰 오차를 나타내었다.
  - 3) 말뚝-지반의 강성이 증가할수록 교대의 변위는 감소하였다. 하지만, 교대 상부의 변위와 하부의 변위의 차는 증가하였다. 이러한 교대의 회전 변위의 증가는 말뚝에 가해지는 모멘트를 증가시킬 것으로 예상된다. 따라서, 말뚝 설계시 기존의 교대 변위량에 의한 말뚝 모멘트에 더하여 교대의 회전 변위를 고려하여야 한다.
  - 4) 이 연구에서 제안한 기초설계 도표는 기초설계시 말뚝에 요구되는 변위를 미리 추정하는데 도움을 줄 것이다.

## 참고문헌

1. Thippeswamy, H. K., GangaRao, H. V. S., and Franco, J., M., "Performance Evaluation of Jointless Bridges," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 7, No. 5, 2002, pp. 276~289.
2. Diceli, M. and Albhaisi, S. M., "Effect of Cyclic Thermal Loading on the Performance of Steel H-Piles in Integral Bridges with Stub-Abutments," *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 60, 2004, pp. 161~182.
3. 박영호, 남문석, "일체식 교대의 토압과 변위 거동," 대한토목학회 논문집, 27권, 3C호, 2007, pp. 163~173.
4. 안진희, 윤지현, 김상효, 김준환, "PSC 일체식 교대 교량의 거동특성 평가," 대한토목학회 논문집, 30권, 4A호, 2010, pp. 361~373.
5. Kim, W. and Laman, J. A., "Numerical Analysis Method for Long-Term Behavior of Integral Abutment Bridges," *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 6, 2010, pp. 1495~1508.
6. American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Washington, DC, 2010.
7. 한국도로공사 도로연구소, 무조인트교량 실용화 연구, 한국도로공사, 1999.
8. Kim, W. and Laman, J. A., "7-Year Field Monitoring of Four Integral Abutment Bridges," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011 (Accepted).
9. Laman, J. A. and Kim, W., *Monitoring of Integral Abutment Bridges and Design Criteria Development*, Final Report No. FHWA - PA - 2009 - 005 - PSU002, Pennsylvania Transportation Research Council, 2009, 650 pp.
10. American Petroleum Institute (API), *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*, 20th Ed., APIRP2A-WSD, Washington, DC, 1993.
11. American Concrete Institute Committee 209, *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*, ACI Manual of Concrete Practice Part I, American Concrete Institute, Detroit, MI, 2004.
12. Oesterle, R., G., Refai, T. M., Volz, J. S., Scanlon, A., and Weiss, W. J., "Jointless and Integral Abutment Bridges Analytical Research and Proposed Design Procedures," *Report DTFH 61-92-C-00154*, FHWA, US Department of Transportation, 1998.
13. Arockiasamy, M., Butrieng, N., and Sivakumar, M., "State-of-the-Art of Integral Abutment Bridges: Design and Practice," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 9, No. 5, 2004.
14. Kim, W. and Laman, J. A., "Integral Abutment Bridge Response under Thermal Loading," *Engineering Structures*, Vol. 32, Issue 6, 2010, pp. 1495~1508.
15. 박종면, 이재혁, 유성근, "P.C. Beam을 이용한 일체식 교대 교량의 설계 및 시공," 콘크리트학회지, 10권, 3호, 1998, pp. 53~61.

**요약** 이 연구는 교량의 생애 동안의 온도 변화와 콘크리트의 시간 의존 영향을 고려하여 PSC 거더 일체식 교량의 해석 방법과 교대의 변위를 예측하는 모델 개발에 관한 것이다. 비선형 수치 해석 모델은 지반-구조물의 상호작용을 고려하며, 재료의 비선형 또한 고려되었다. 개발된 수치 해석 모델을 이용하여 총 243가지의 경우에 대하여 변수 연구를 하였다. 고려된 변수는 (1) 열팽창 계수, (2) 교량 길이, (3) 뒤편재의 높이, (4) 뒤편재의 강성, 그리고 (5) 말뚝-지반 강성이다. 변수 연구의 결과는 열팽창 계수, 교량 길이, 말뚝-지반의 강성이 지배적인 영향을 나타내는 것으로 드러났다. 또한, 교량의 길이는 교대의 윗부분의 변위에 지배적인 영향을 미치며 자유팽창·수축과 유사하였다. 하부의 변위에는 다른 변수들의 영향으로 추정이 쉽지 않았다. 개발된 교대의 변위 추정 모델은 기본 설계시에 사용될 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 일체식 교대, 교량, 온도하중, 시간 의존, 지반-구조물 상호작용