

## 토압분리형 교량의 구조해석을 통한 허용 변위량 검토

김홍배<sup>1</sup>, 한희수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국도로공사 강원본부 구조물안전팀, <sup>2</sup>금오공과대학교 토목공학과

### Examination of Allowable Displacement by Structural Analysis of IPM Bridge

Hong-Bae Kim<sup>1</sup>, Heui-Soo Han<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Structural Safety Team of Gangwon Headquarters, Korea Expressway Corporation

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Kumoh Institute of Technology

**요약** IPM Bridge는 파일벤트가 지표면으로부터 돌출되어, 교대의 과도한 변위가 유발될 수 있다. 본 연구에 사용된 교량의 형상은 IPM Bridge의 설계지침에 제시된 최대 적용 조건인 경간 120.0m, 사각 30도, 파일벤트의 돌출높이 최대 10.0m를 적용하였다. 이 교량모델을 이용하여, IPM Bridge의 최대 경간 적용조건에 따른 최대 변위를 산정하였으며, Bozozuk가 제시한 허용 변위에 근거하여 IPM Bridge의 수평변위의 안정성을 검토하였다. IPM Bridge의 최대 수평변위는 여름철의 팽창 조건보다는 겨울철의 수축 조건에서 더 크게 산정되었으며, 수평변위는 사각보다는 교량의 길이에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 수직 변위는 사각과 연장에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 경간의 증가에 따라 수평변위가 크게 증가되었으며, 연장 120.0m에서의 수평변위는 Bozozuk가 제시한 허용 변위를 초과하는 것으로 나타났다. 하지만, 파일벤트에 발생되는 모멘트가 소성모멘트를 초과하지는 않았다. IPM Bridge는 설계지침에 제시된 최대 적용조건인 파일벤트의 돌출높이 10.0m, 연장 120.0m에서는 수평변위가 과도하게 발생될 수 있으므로, 설계단계에서 면밀한 검토가 필요하다.

**Abstract** Because the pile-bent of IPM Bridge is projected from the soil surface, excessive displacement of abutment can be induced. According to design guide of IPM Bridge, the shape of the bridges used in this study was applied to the maximum applicable 120.0m span, 30-degree for skew angle, and 10.0m for the protruded pile-bent height. The maximum displacement by the maximum span application condition of the IPM Bridge was calculated using this bridge model, and the safety of a horizontal displacement of the IPM Bridge was investigated based on the allowable displacement presented by Bozozuk. The maximum horizontal displacement of the IPM Bridge was calculated to be larger in the winter shrinkage condition than in the summer expansion condition, the horizontal displacements were more affected by the length of a bridge than by the skew angle. And the vertical displacement was not affected by the skew angle and length. As the span increases, the horizontal displacement increases significantly, the horizontal displacement at 120.0m span length was found to exceed the allowable displacement proposed by Bozozuk. However, the moment generated in the pile-bent did not exceed the plastic moment.

**Keywords** : IPM Bridge, Pile Bent, Structural Analysis, Horizontal Displacement, Allowable Displacement

### 1. 서론

Bridge(Integral Abutment Bridge)와 MSEW Bridge (Mechanically Stabilized Earth Wall Bridge)의 장점을

IPM Bridge는 Nam et al. (2016)[1]에 의해 IAB

결합한 Integrated and Pile Bented Abutment with

본 연구는 한국도로공사의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Heui-Soo Han(Kumoh Institute of Technology)

Tel: +82-54-478-7618 email: hanhs@kumoh.ac.kr

Received January 31, 2019

Revised March 21, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

Mechanically Stabilized Earth Wall Bridge (이하 IPM Bridge, 국문명은 토압분리형 일체식 교대 교량)이다[1]. IPM Bridge는 IAB Bridge와 동일하게, 상부구조와 하부구조가 일체화되어 있지만, 교대 배면의 횡방향 토압을 보강토옹벽으로 분리하여 지지한다. 보강토옹벽으로 인해 Fig. 1과 같이 말뚝기초는 지표면으로부터 돌출된 파일벤트 형식이다. 이 파일벤트는 상부구조의 수직하중뿐만 아니라 온도하중과 시간의존적 하중 등에 의한 수평변위까지 지지하여야 한다[2-3].



Fig. 1. Schematic of IPM bridge [1];

IPM Bridge는 보강토옹벽으로 횡방향 토압을 지지하지만, 전체적인 교량의 거동 특성은 IAB bridge와 동일하다. 상부 구조와 하부 구조가 일체식으로 연결되는 구조 특성 때문에 온도하중, 지반과 구조물의 상호작용에 복합적인 영향을 받는다. 특히, PSC (Prestressed concrete) 거더를 사용한 IAB Bridge는 시간 의존적 특성(Time-Dependent Effect)이 교대의 거동에 커다란 영향을 미친다[4-5]. 하지만, IAB Bridge의 무다짐 뒤채움층과 성토층간의 다짐 차이로 인해 국부적인 변형이 발생되어 접속슬래브의 침하를 유발시킨다. 그리고 상부구조의 팽창으로 인해 교대 배면에 과도한 수동토압이 발생되며 이를 감소시키기 위해 무다짐 뒤채움층에 대한 별도의 성토 및 다짐 계획이 필요하다[6-8].

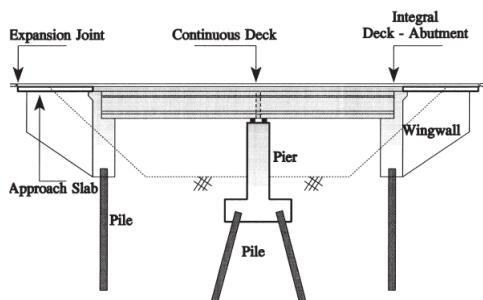


Fig. 2. Typical integral abutment bridge with 2-spans [9];

IPM Bridge는 Fig. 2에 제시된 IAB bridge와 달리 보

강토옹벽의 배면의 횡방향 토압을 분리하여 지지하기 때문에, 앞성토와 교대 배면의 뒤채움층이 시공되지 않는다[9]. 이로 인해 시공성과 경제성을 높이고, 강관 말뚝으로 시공된 파일벤트의 유연성으로 인해 말뚝 머리에 작용되는 휨모멘트를 감소시킬 수 있다.

하지만, 상부구조의 수직하중뿐만 아니라 수평변위까지 모두 파일벤트로 지지하기 때문에 과도한 수평변위가 유발될 수 있다. Park and Nam (2018)[2]에 의해 수행된 IPM Bridge의 구조해석 결과에서도 파일벤트의 돌출높이가 높아지면, 말뚝 머리의 부재력은 감소되고 수평변위는 증가되는 것으로 나타났다. 연장 120.0m에서도 말뚝 머리에 작용되는 휨모멘트는 강관말뚝의 소성모멘트보다 작게 산정되었다. 구조물기초 설계기준(2015)[10]에서는 말뚝 자체의 허용 변위보다는 부재력의 만족 여부를 우선 검토하도록 제시하고 있다. 하지만, IPM Bridge의 연장이 길어지거나 사각이 커지면, 과도한 수평변위가 유발되어 상부구조에 손상을 유발할 수 있다. 또한, 한국도로공사의 IPM Bridge 설계지침(2016)[11]에서는 파일벤트의 두부에 발생하는 휨모멘트가 소성모멘트를 초과하는 지 여부만을 검토하여 변위는 별도로 검토하지 않도록 하고 있다. 따라서, IPM Bridge 설계지침에 제시된 IPM Bridge의 적용조건에 따라 매개변수해석을 수행하여, 허용변위의 만족여부를 검토하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 IPM Bridge의 구조해석을 통한 허용 변위량을 검토하였다. 교량의 형상은 IPM Bridge의 설계지침에 제시된 최대 적용 조건인 연장 120.0m, 사각 30도이다. Park and Nam (2018)[2]이 수행한 구조해석에서 돌출높이가 클수록 수평변위가 증가되었기 때문에, 파일벤트의 돌출높이는 IPM Bridge 설계지침에 제시된 최대 높이 10.0m를 적용하였다. 구조해석 결과에서 수평변위는 온도 팽창의 여름철과 온도 수축의 겨울철로 구분하여 산정했다. 그리고, Bozozuk et al. (1978)[12]이 제시한 허용 수평변위에 근거하여 IPM Bridge의 수평변위를 검토하였다.

## 2. 토압분리형 교량

### 2.1 설계방법

IPM Bridge는, IAB Bridge와 동일한 설계개념과 거

동 특성을 나타내지만, 말뚝기초가 지표면에서 돌출된 파일벤트 형식의 말뚝기초이다. 이로 인해 말뚝 두부의 부재력이 일체식 교대와 비교하여 상대적으로 작게 작용하게 된다. IPM Bridge의 설계는 일반적인 IAB Bridge와 동일하며, Standard Specifications for Highway Bridges(17th Edition)에 제시된 교량의 설계기준(design code)과 일체식 교량 설계지침, Integral Abutment Bridge Design Guidelines 등에 제시된 설계지침(design guideline)을 준수하여야 한다[6,13-14].

IPM Bridge의 설계절차는 IPM Bridge 설계지침[11]에 제시되었다. IPM Bridge은 교량의 중단계획에 따라 보강토 옹벽의 높이를 결정한 후 파일벤트의 돌출높이를 결정하게 된다. 이후 상부구조와 하부구조를 일체화하여 교량의 구조해석을 수행하게 된다.

IPM Bridge의 파일벤트는 지표면에서 돌출되어 수직 하중 외에도 온도신축, 건조수축과 크리프 등에 의한 횡방향 변위를 지지하며, 파일벤트의 거동은 지반과의 상호작용에 지배된다[15]. 이 해석을 위해 말뚝-지반 상호작용을 고려하는 p-y해석을 수행하며, 구조물기초설계기준[10]에 제시된 지반스프링(p-y곡선)을 적용한다.

파일벤트의 설계는 일체식 교대 설계지침[14]에서 제시한 바와 같이 압축과 휨을 동시에 받는 기둥 부재로 설계한다. 국부좌굴(local buckling) 혹은 주름짐(wrinkling)이 발생할 수 있으므로 축방향 압축부재의 폭-두께비 제한을 검토하여 국부좌굴 발생을 방지하여야 한다. 또한, 휨모멘트의 분포에 따라 가상 힌지점을 기준으로 상부영역과 압축만 받는 하부영역으로 나누어 단면 설계를 수행한다. 각 영역의 경계조건에 따라 유효길이 계수를 적용하며, 소성힌지의 발생여부를 검토하여야 한다[15].

하지만, Fig. 3에 보인 바와 같이 상부구조의 수평변위(Fig. 3 a) 및 교대의 회전(Fig. 3 b)에 따라 파일벤트의 두부에 작용되는 휨모멘트가 지배된다. 그러나, IPM Bridge 설계지침은 파일벤트의 두부에 발생한 수평변위 및 교대회전에 따른 휨모멘트가 소성모멘트를 초과하는지 여부만 고려하고, 허용 변위량의 만족여부는 검토하지 않고 있다.

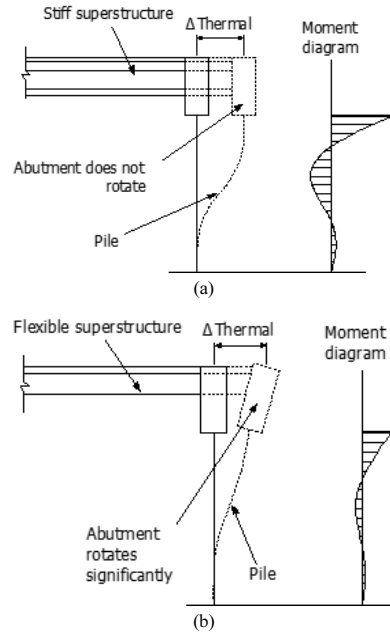


Fig. 3. Moment diagram of pile-bent by thermal load [14]; (a) Horizontal displacement (b) Rotation

## 2.2 교량의 허용 변위량

교대 및 기초의 침하와 변위는 상부구조의 손상을 유발시킬 수 있다. 이러한 교대의 침하가 상부구조에 손상을 유발시키는 정도는 최종 침하량(전체 혹은 부분)뿐만 아니라 상부 구조물의 형태, 경간의 숫자와 길이, 거더의 강성에 의해 결정된다. 교량 전체의 동일한 전체 침하는 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치지 않는다[16]. 과도한 전체 침하는 교량받침의 침하 등과 같은 현실적인 문제를 야기한다. 그러나 부등침하는 작더라도 심각한 문제를 야기한다.

Moulton and Kula(1980)[17]는 하부기초의 변위가 발생되었던 교량들을 현장 데이터를 기반으로, 종방향의 각 변형이 유지보수 비용이 많이 드는 교량의 손상임을 판명하였다. Moulton et al.(1985)[18]은 단경간의 강교에 대해서,  $0.005L$  (여기서,  $L$ 은 교량의 연장(mm))보다 작은 각 변형의 97.2%는 견딜 수 있다고 발표했다. 또한 연속교의 강교에 대해서는  $0.004L$ (mm)보다 작은 각 변형의 93.7%는 견딜 수 있다고 했다.

Moulton et al.(1985)[18]은 콘크리트 교량을 대상으로 매개변수연구에 따른 정적 해석을 수행하였고, 최종적으로 각 변형의 한계(mm)는 단경간교와 다경간교에

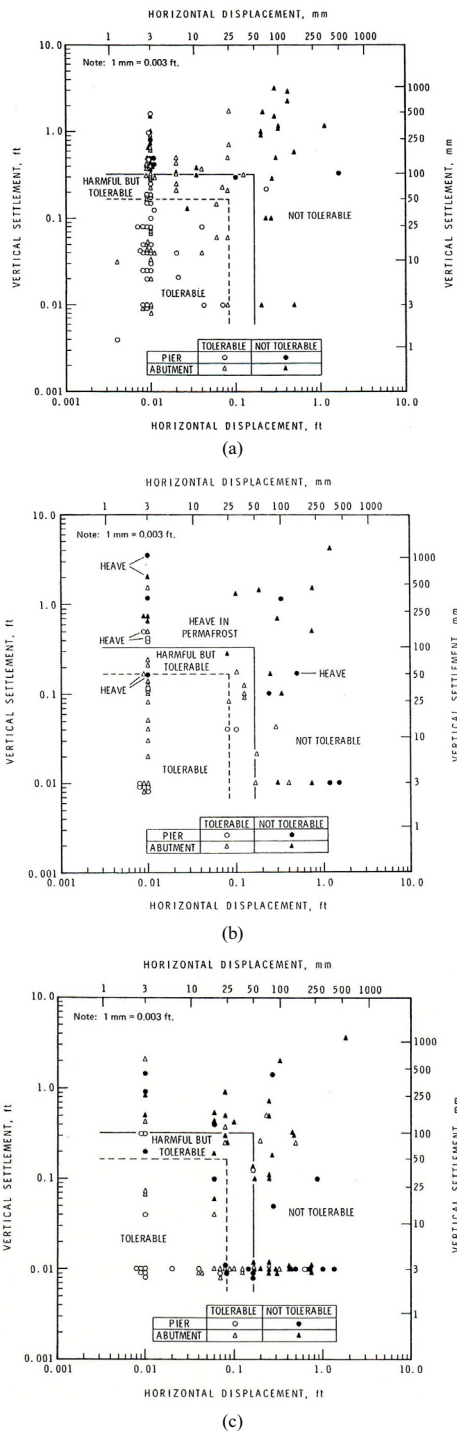


Fig. 4. Allowable displacement of bridge [12]; (a) Shallow foundation, (b) Friction pile, (c) End bearing pile

대해 각각 0.005L(mm)와 0.004L(mm)가 되어져야 한다고 권고했다. 이러한 권고에 근거하여, AASHTO(2002)[13]는 예상되어지는 각 변형이 Moulton et al.(1985)에 의해 권고되어진 값의 50%보다 큰 경우, 교대가 보강토 옹벽 위에 만들어지면 안된다고 언급했다[18].

Bozozuk et al.(1978)[12]은 미국과 캐나다의 수 백개의 교량에 대한 유지관리 자료로부터 교랑기초의 연직 및 수평 허용변위를 정량적으로 제안한 바 있다. 조사된 자료로 부터 교랑기초의 형식을 크게 (1)직접기초, (2)마찰말뚝으로 지지된 교랑, (3) 선단지지말뚝으로 지지된 교랑으로 구분한 후 각각의 교랑에서의 수평 및 연직 변위량과 교랑의 문제발생여부를 함께 나타냄으로서 허용변위 기준을 Fig. 4와 같이 제안하였다.

Bozozuk et al.(1978)[12]이 제시한 허용변위 기준은 다음과 같다.

- (1)  $s_v < 50\text{mm}$ ,  $s_h < 25\text{mm}$   
: 허용가능
- (2)  $50\text{mm} < s_v < 100\text{mm}$ ,  $25\text{mm} < s_h < 50\text{mm}$   
: 약간의 손상이 있지만 허용가능
- (3)  $s_v > 100\text{mm}$ ,  $s_h > 50\text{mm}$   
: 허용할 수 없음 (손상가능성 높음)

where,  $s_v$  vertical displacement,  $s_h$  horizontal displacement

### 3. 구조해석

#### 3.1 IPM Bridge의 형상과 재료 특성

본 연구에서는 IPM Bridge의 허용 변위량을 검토하기 위해 구조해석을 수행하였다. PSC거더는 강재와 달리 시간의존적 하중의 영향을 크게 받는다[4-5]. 그러므로 IPM Bridge의 설계지침에는 콘크리트 교랑의 최대 연장을 120.0m로 제한하고 있다[11]. 따라서 허용 변위량의 만족 여부를 검토하기 위해서 Fig. 5에 제시된 한국도로공사의 연장 30m PSC 표준도를 적용하였다. 시공단계 해석에서 강연선의 이완(Relaxation)에 의한 영향은 무시하였다.

IPM Bridge를 구성하는 부재들의 재료는 크게 콘크리트와 강재로 구분된다. PSC 거더의 압축강도 40MPa의 콘크리트이며, 교대와 바닥판 및 접속슬래브는 압축

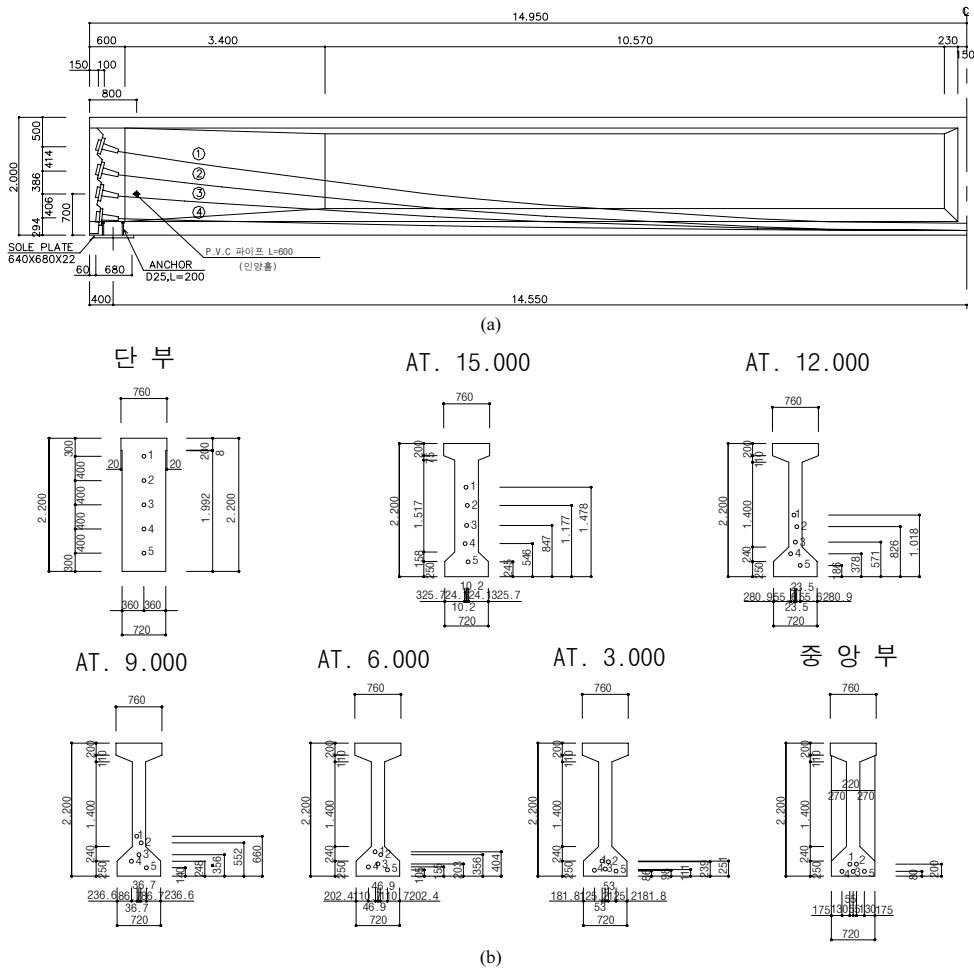


Fig. 5. 30.0m PSC girder proposed by Korea express corporation; (a) Side view, (b) Cross-section view

강도 27MPa의 콘크리트이다. 파일벤트는 STK490 등급의 강관말뚝을 사용하였으며, 탄성계수는  $2.05 \times 10^8 \text{ MPa}$ 이다(Table 1 참조).

Table 1. Abutment properties of IPM bridge for analyses

Properties	Grade	$E_c$ ( $kN/m^2$ )	$\nu$	$\alpha_c$ ( $1/^\circ\text{C}$ )	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )
Concrete	C40	$2.998 \times 10^7$	0.18	$1.0 \times 10^{-5}$	24.52
	C27	$2.668 \times 10^7$	0.18	$1.0 \times 10^{-5}$	24.52
Steel	STK490	$2.05 \times 10^8$	0.3	$1.2 \times 10^{-5}$	76.98

### 3.2 IPM Bridge의 구조해석 모델

Fig. 6은 IPM Bridge의 구조해석 모델을 나타낸 것으

로, Fig. 6 (a)는 IPM Bridge의 측면도 이다. Park and Nam (2018 a, b)[2-3]은 IPM Bridge의 구조해석 시 파일벤트의 돌출높이를 4.0 ~ 10.0m까지 구조해석을 수행하였지만, 돌출높이 10.0m에서 최대변위가 발생하므로 본 연구에서는 최대 변위가 발생하는 돌출높이 10.0m에 대해서만 구조해석을 수행하였다. Fig. 6 (b)는 본 해석에 사용된 구조해석 모델로, 휨 부재는 모두 보요소(Beam element)로 모델링하였으며, 바닥판과 접속슬래브는 판 요소(Plate element)로 모델링하였다. 바닥판과 거더는 강체 연결(Rigid link)하고, 접속슬래브는 수직 지반 스프링으로 지지시켰다. 이때 스프링의 강성은 한국도로공사의 노상 지지력계수 200MN/m3을 입력하였다[19]. 그리고 접속슬래브와 벽체 교대는 힌지로 연결

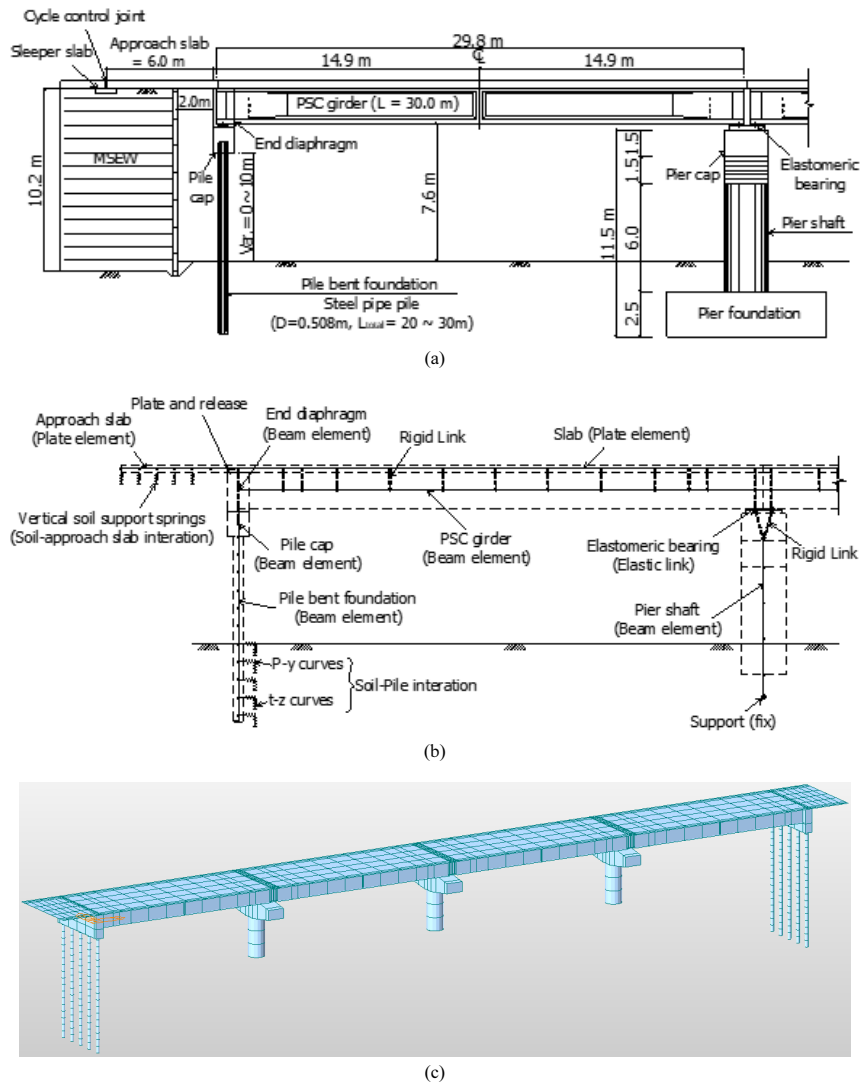


Fig. 6. Structural analysis model for IPM bridge; (a) Side view, (b) Numerical model, (c) 3D model

되므로, Plate and Release 옵션으로 회전을 허용하였다.

IPM Bridge의 교각은 다양한 교각 형식의 적용이 가능하다. 본 연구에서는 역T형 교각으로 모델링하고, 거더와의 연결은 탄성받침을 모사하는 탄성 스프링을 적용하였다. 탄성받침은 경간장 30.0m에 가장 많이 적용되는 규격은 1,350kN로써, 압축 스프링 계수는 333.42kN/m, 전단 스프링 계수는 1840.0kN/m이다.

파일벤투 말뚝과 지반 사이의 상호작용에 의한 IPM Bridge의 거동은 상부구조의 수평변위를 지지하는 파일벤투에 의해 지배되며, 말뚝의 수평변위가 커지면 지반

이 항복하여 비선형성을 나타낸다. 말뚝과 지반사이의 수평 거동은 쌍곡선 형태의 p-y곡선으로 나타낼 수 있으며, 다양한 지반조건에 따른 p-y곡선은 여러 학자들에 의해 제시되었다.

본 연구에서는 구조물기초설계기준 해설(2015) [10]에 제시된 Reese et al.(1974)[20]의 사질토의 P-y곡선을 적용하였다. Reese et al.은 강관말뚝의 현장 재하시험 결과로부터 임의 깊이에 대한 p-y곡선을 Fig. 7과 같이 제안하였다.

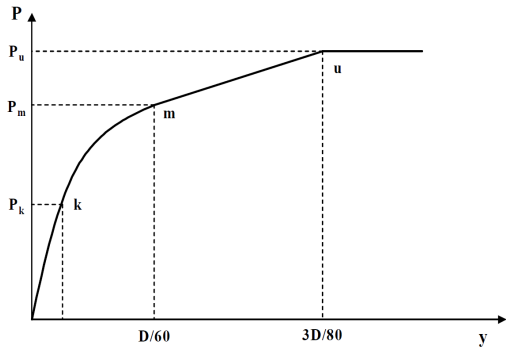


Fig. 7. p-y curve by Reese et al.(1974)[20]

본 연구의 구조해석은 MIDAS사의 Civil 2012를 이용하였다. 이 프로그램에서는 지반의 p-y곡선을 다중 선형 스프링(Multi-Linear Spring)으로 입력할 수 있다.

파일벤투가 근입된 지반의 강도는 표준관입시험의 N 값으로 30을 사용하였다. 이는 촘촘한 모래의 사질토 지반을 의미한다. 즉, IPM Bridge의 설계지침에 제시된 허용 지반조건을 만족하는 양질의 사질토 지반으로, 파일벤투의 지지보다는 보강토 옹벽의 침하가 상대적으로 작게 발생하기 위해 필요한 지반조건이다.

파일벤투는 IPM Bridge 설계지침에 제시된 직경 508mm, 두께 12mm의 강관말뚝을 이용하였으며, p-y곡선인 다중 선형 스프링을 생성하기 위한 수평지반반력 계수( $k_h$ )는 구조물기초설계기준[10]에 제시된 식 (1)을 이용하였다.

$$k_h = 1.208 \cdot (\alpha \cdot E_0)^{1.103} \cdot D^{-0.281} \cdot (EI)^{-0.103} \quad (1)$$

where  $\alpha$  compensation factor,  $E_0$  modulus of foundation,  $D$  diameter of pile,  $EI$  bending rigidity

여기서, 지반의 탄성계수( $E_0$ )는 한국도로공사에서 제시한 700N을 이용하였으며, 21,000 kPa이다.  $D$ 는 강관말뚝의 직경이고,  $EI$ 는 강관말뚝의 휨강성이다. 식 (1)로 산정된 수평 지반반력계수는 26,182 kN/m<sup>3</sup>이다.

Fig. 8은 MIDAS Civil 2012에서 IPM Bridge의 파일벤투에 적용된 다중 선형 스프링으로 산정한 p-y곡선이다. Fig. 8을 보면, Fig. 7에 제시된 p-y곡선과 동일하게 지반반력의 항복점( $P_u$ )를 가지는 것을 알 수 있다.

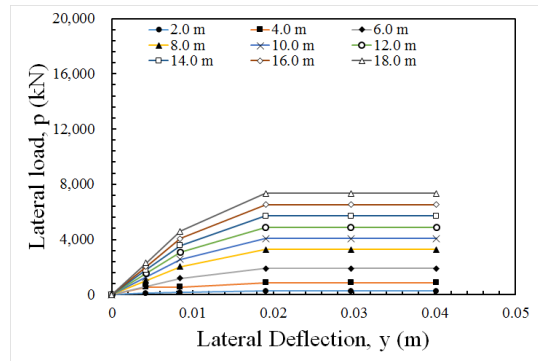


Fig. 8. Multi-linear spring as p-y curve

### 3.3 IPM Bridge의 하중조건

IPM Bridge의 허용 변위량을 검토하기 위해, 사하중과 활하중을 해석에 적용하였을 뿐 아니라, PSC거더의 수평변위를 유발시키는 온도하중, 건조수축 및 크리프를 해석에 적용하였다.

Park and Nam (2018)[2]이 수행한 구조해석 결과에서 온도수축과 건조수축이 중첩되는 겨울철과 온도팽창과 크리프, 사하중, 활하중이 중첩되는 여름철의 파일벤투 변위가 다르게 산정되었다. 따라서 본 연구에서도 최대 변위가 발생하는 겨울철은 수축과 여름철의 팽창으로 구분하여 해석을 수행하였다.

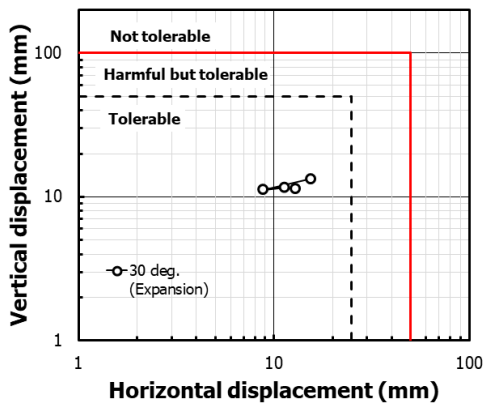
사하중은 프로그램에서 자동 적용되며, 활하중으로 도로교설계기준(2008)[21]에 제시된 표준트럭하중을 재하하였다. 온도하중은 PSC교의 한랭한 지방의 온도 변화인  $-15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ , 열팽창계수는  $1.0 \times 10^{-5} (1/^{\circ}\text{C})$ 을 적용하였다. 이때, 가설온도  $10^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 온도해석을 수행하였다. 건조수축과 크리프는 CEB-FIP의 제안식을 적용하였다[14]. 콘크리트의 28일 압축강도는 40MPa를 적용하였으며, 시멘트의 종류는 보통시멘트로 적용하였다. 타설 후 건조수축 시작 시간은 3일로 설정하였다.

## 4. 해석결과

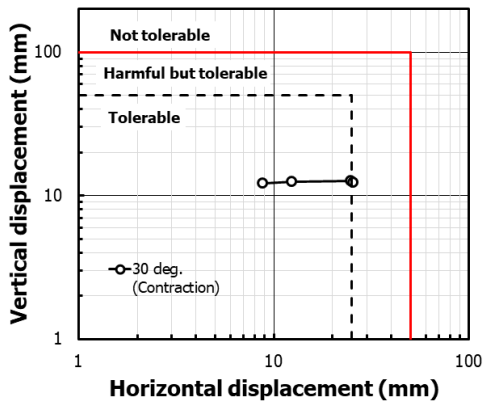
IPM Bridge의 최대 변위는 겨울철의 수축과 여름철의 팽창조건으로 구분하여 검토하였다. 그리고 최대 경간 연장인 120.0m에서 사각에 따른 최대 변위와 최대 사각인 30도에서, 연장에 따른 최대변위를 검토하였다.

Table 2. Maximum displacement of IPM bridge at maximum skew (30 degrees)

Expansion (Bridge skew : 30 deg.)					
Bridge length (m)		30	60	90	120
Displacement (mm)	H	15.4	8.78	11.26	12.95
	V	13.3	11.2	11.62	11.45
Contraction (Bridge skew : 30 deg.)					
Bridge length (m)		30	60	90	120
Displacement (mm)	H	8.81	12.41	24.8	25.62
	V	12.17	12.51	12.73	12.32



(a)



(b)

Fig. 9. Verification on allowable displacement according to bridge length of IPM bridge at 30-degree skew; (a) Expansion (b) Contraction

그리고 산정된 최대 변위를 Bozozuk et al.(1978)[12]이 제시한 말뚝기초의 허용 변위량을 기준으로 검증하였다.

Table 2는 IPM Bridge의 최대 사각인 30도에서 교량

의 연장에 따른 최대 변위를 해석한 결과이다. 교량의 양단을 모두 파일벤트가 지지하기 때문에, 단경간인 30.0m에서 최대변위가 발생되었다. 겨울철의 수축 조건에서는 수평변위가 30.0m에서 15.4mm, 120.0m에서는 12.95mm로 산정되었다.

2경간인 60.0m부터 4경간인 120.0m에서는 수평 변위와 수직 변위가 소폭으로 증가되었다. 여름철의 팽창 조건에서는 수평 변위가 교량의 연장에 따라 증가되었으며, 120.0m에서는 최대 25.62mm가 발생되었다. 경간이 길어짐에 따라, 수평변위 수축량이 증가되는 것은 상부 구조의 PSC거더를 연속교로 해석하였기 때문이다.

Fig. 9는 Table 2에서 산정된 최대변위를 Bozozuk et al.(1978)[12]이 제시한 말뚝기초의 허용 변위기준으로 검증한 것이다. Fig. 9 (a)에 보인 팽창조건에서는 모두 허용 범위 내에서 수직과 수평변위가 발생하는 것으로 나타났다. 하지만, Fig. 9 (b)의 수축조건에서는 경간 연장의 증가에 따라, 수직변위는 거의 변화가 없었지만, 수평변위는 크게 증가되었다. 그리고 최대 연장 120.0m에서는 약간의 손상이 있지만 허용 가능한 범위까지 수평 변위가 발생되었다. 하지만, 파일벤트에 발생하는 모멘트가 소성모멘트를 초과하지는 않았다.

Table 3. Maximum displacement of IPM bridge at maximum length of bridge(120.0m)

Expansion (Bridge length : 120.0m)				
Bridge skew (deg.)		0	15	30
Displacement (mm)	H	11.55	13.13	12.95
	V	11.3	12.16	11.45
Contraction (Bridge length : 120.0m)				
Bridge skew (deg.)		0	15	30
Displacement (mm)	H	23.95	25.58	25.62
	V	13.03	13.6	12.32

Table 3은 IPM Bridge의 최대 연장인 120.0m에서 교량의 사각에 따른 최대 변위를 해석한 결과이다. Table 2에서와 같이, 팽창보다 수축 거동에서 더 큰 수평변위가 발생되었다. 발생된 변위는 사각의 증가에 따라 일정하게 증가되지는 않았다.

Fig. 10은 Table 3에서 산정된 최대변위를 Bozozuk et al.(1978)[12]이 제시한 말뚝기초의 허용 변위기준으로 검증한 것이다. Fig. 10 (a)에 제시된 팽창조건 수평변위보다 Fig. 10 (b)의 수축조건 수평변위가 더 크



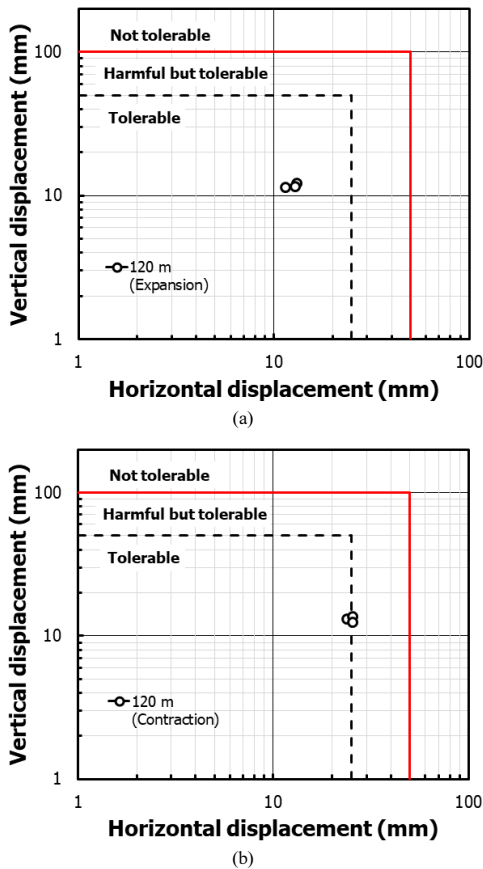


Fig. 10. Verification on the allowable displacement according to bridge skew of IPM bridge at 120.0m span length; (a) Expansion, (b) Contraction

계 산정되었다. 그리고, 수축조건에서는 약간의 손상이 유발되는 범위까지 변위가 발생되었다. 하지만, 교량의 사각에 따라서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

IPM Bridge를 최대 사각인 30도에서 해석한경간 연장길이별로 해석한 결과 및 최대 연장인 120.0m에서 사각별로 해석한 결과 모두 최대 수평변위는 여름철의 팽창조건보다는 겨울철의 수축조건에서 더 큰 것으로 분석되었다. 즉, 상대적으로 무시되고 있는 겨울철의 수축은 도하중이 여름철의 팽창온도하중보다 교량의 변위에 더 큰 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 이는 일반적인 여름철 팽창변위 위주의 교량 및 구조물의 유지관리 대책보다 겨울철 수축변위를 고려한 유지관리 대책이 필요함을 말해준다.

## 5. 결론

본 연구에서는 IPM Bridge의 최대 경간 적용조건에 따른, 교량 구조해석을 수행하여 최대 압축 및 팽창 변위를 산정하였다. 그리고 Bozozuk et al. (1978)[12]이 제시한 허용 변위에 근거하여 IPM Bridge의 최대변위를 검토하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 최대 사각인 30도에서 교량의 연장에 따른 말뚝 두부 변위를 해석한 결과는 아래와 같다.

- 1) 수축조건(겨울)
  - 30.0m에서 15.4mm, 4경간 120.0m에서 12.95mm로 교량의 양단을 모두 파일벤트가 지지하는 단경간에서 최대 변위가 발생되었다.
  - 2경간인 60.0m부터 4경간인 120.0m에서는 수평 변위와 수직 변위가 소폭으로 증가되었다. 경간 연장의 증가에 따라, 수직변위는 거의 변화가 없었지만, 수평변위는 증가되었다.
  - 경간 연장 120.0m의 최대변위를 Bozozuk et al.이 제시한 말뚝기초의 허용 변위기준으로 검증한 결과, 말뚝 두부에 약간의 손상이 발생할 것으로 판단되지만 허용 가능한 변위로 평가된다.
  - 파일벤트에 발생하는 모멘트가 소성모멘트를 초과하지는 않았다.

2) 팽창조건(여름)

- 여름철의 팽창 조건에서 2경간인 60.0m부터 4경간인 120.0m까지 경간의 증가에 따라 말뚝 두부의 수평 변위가 증가되었으며, 120.0m에서는 최대 25.62mm가 발생되었다.
- 분석된 최대변위를 Bozozuk et al.이 제시한 말뚝기초의 허용 변위기준으로 검증한 결과, 팽창조건에서는 모두 허용 범위 내에서 수직과 수평변위가 발생하는 것으로 나타났다.

2. 최대 경간 연장인 120.0m에서 사각에 따른 말뚝 두부 변위를 해석한 결과는 아래와 같다.

- 1) 팽창보다 겨울철 수축 거동에서 더 큰 수평변위가 발생되었다.
- 2) 경간 연장 120.0m에서 사각변화에 따른 최대변위를 Bozozuk et al.이 제시한 말뚝기초의 허용 변위 기준으로 검증한 결과, (1) 팽창조건 수평변위보

다 수축조건의 수평변위가 더 크게 산정되었다. 그리고, (2) 수축조건에서는 약간의 손상이 유발되나 허용할 수 있는 범위까지 변위가 발생되었다

3. IPM Bridge를 최대 사각인 30도에서 해석한 결과 및 최대 연장인 120.0m에서 해석한 결과 모두 1최대 수평변위는 여름철의 팽창조건보다는 겨울철의 수축조건에서 더 큰 것으로 분석되었다. 즉, 여름철 팽창변위 위주의 교량의 유지관리 대책뿐만 아니라, 겨울철 수축변위를 고려한 유지관리 대책이 필요함을 말해준다.
4. IPM Bridge의 수평변위는 사각보다는 교량의 연장에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으나, 수직 변위는 사각과 연장에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
5. IPM Bridge는 설계지침에 제시된 최대 적용조건인 파일벤트의 돌출높이 10.0m, 연장 120.0m에서는 수평변위가 과도하게 발생될 수 있으므로, 설계 단계에서 면밀한 검토가 필요하다.

## References

- [1] M. S. Nam, J. N. Do, T. S. Kim, Y. H. Park, H. J. Kim, Development of IPM Bridge, Korea Expressway Corporation Research Institute: Korea, 2016.
- [2] M. C. Park, M. S. Nam, "Behavior of integral abutment bridge with partially protruded piles", *Geomechanics and Engineering*, Vol.14, No.6, pp.601-614, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/gae.2018.14.6.601>
- [3] M. C. Park, M. S. Nam, "Numerical Analysis of the Behavior of an IPM Bridge According to Super-Structure and Sub-Structure Properties", *Sustainability*, Vol.10, No.3, pp.833, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10030833>
- [4] W. S. Kim, J. A. Laman, "Integral abutment bridge behavior under uncertain thermal and time-dependent load", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.46, No.1, pp.53-73, 2013. DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2013.46.1.053>
- [5] S. M. Olson, K. P. Holloway, J. M. Buenker, J. H. Long, J. M. LaFave, "Thermal behavior of IDOT integral abutment bridges and proposed design modifications", FHWA-ICT-12-022, Illinois Center for Transportation, Illinois, pp.1-63, 2013.
- [6] KECRI, "Integral Bridge design Guidelines", Korea Expressway Corporation Research Institute, pp.1-59, 2009.
- [7] A. Lemnitzer, E. R. Ahlberg, R. L. Nigbor, A. Shamsabadi, J. W. Wallace, J. P. Stewart, "Lateral performance of full-scale bridge abutment wall with granular backfill", *Journal of Geo-environmental Engineering*, Vol.134, No.4, pp.506-514, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:4\(506\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:4(506))
- [8] Y. H. Park, M. S. Nam, "Behavior of earth pressure and movements on integral abutments." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.3C, pp.163-173, 2007.
- [9] S. Arsoy, J. M. Duncan, R. M. Barker, "Behavior of a Semiintegral Bridge Abutment under Static and Temperature-Induced Cyclic Loading", *Journal of Bridge Engineering*, Vol.9, No.2, pp.193-199, 2004. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2004\)9:2\(193\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:2(193))
- [10] Korean Geotechnical Society, Structure foundation design standards specification, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2015.
- [11] KEC, "IPM Bridge design Guidelines", Korea Expressway Corporation, 2016.
- [12] M. Bozozuk, Bridge Foundation Move, Transportation Research Record 678: Tolerable Movements of Bridge Foundation, Sand Drains, K-Test, Slopes, and Culverts, Transportation Research Board, National Research Council, Washinton, D.C., pp.17-21, 1978.
- [13] AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 17th edition. Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 2002.
- [14] VTrans IAC. "Integral Abutment Bridge Design Guidelines, 2ed. VTrans Structures Section", Montpelier, Vermont: the State of Vermont, Agency of Transportation, 2008.
- [15] T. S. Kim, "Performance Verification and Behavior Analysis of Integrated and Pile Bented Abutment with Mechanically Stabilized Earth Wall Bridge(IPM Bridge)", Thesis paper, Kumoh National Institute of Technology, 2017.
- [16] P. D. Egan, Design and performance of reinforced earth bridge abutments. In: Proceedings of the 1st International Bridge Conference, Pittsburgh, PA, pp.92-98, 1984.
- [17] L. K. Moulton, J. R. Kula, "Bridge movements and their effects", *Public Roads*, Vol.44, No.2, pp.62-75, 1980.
- [18] L. K. Moulton, H. V. S. GangaRao, G. T. Halvorsen, "Tolerable movement criteria for highway bridges", Report No. FHWA/RD-85/107. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C., October 1985.
- [19] KEC (2012). "Expressway Construction Guide Specification." Korea Expressway Corporation.
- [20] L. C. Reese, W. R. Cox, F. D. Koop, "Analysis of laterally loaded piles in sand", *Offshore Technology in Civil Engineering Hall of Fame Papers from the Early Years*, OTC 2080, pp.95-105, 1974. DOI: <https://doi.org/10.4043/2080-MS>
- [21] MLTMA, "Road design manual", Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2008.

김 흥 배(Hong-Bae Kim)

[정회원]



- 1991년 12월 ~ 현재 : 한국도로공사 근무
- 2005년 8월 : 고려대학교 일반대학원 토목공학전공 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 일반대학원 토목공학과 박사과정

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토옹벽

---

한 희 수(Heui-Soo Han)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 12월 : South Dakota School of Mines Technology (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토옹벽