

사각 프리스트레스트 말뚝형 기둥 기초적 특성 사례 연구 I

A Basic Analysis of Behavior of Rectangular Prestressed Pilecolumn I

전 경 수¹⁾ · 김 낙 영[†] · 정 규 정²⁾

Kyungsu Chon · Nagyoung Kim · Kyuchung Chung

Received: August 23rd, 2013; Revised: September 2nd, 2013; Accepted: October 18th, 2013

ABSTRACT : A substructure of bridges is very important structural element for safety and supporting not only vertical loads as dead load and live load but lateral loads as break load, wind load, seismic load, hydrostatic pressure and dynamic water pressure, lateral earth pressure, impulsive load, temperature change and load effect of temperature change, creep and shrinkage. Most of domestic bridges are reinforced concrete piers and have an effect on economy of bridge. Recently, understanding importance of substructure, we are getting more interested in new substructure system.

Keywords : Substructure of bridge, Vertical load, Live load, Pilecolumn

요 지 : 교량의 하부구조는 고정하중과 차량 활하중 등의 수직 방향 하중을 지지할 뿐만 아니라 횡방향 하중을 지지해야 하므로 교량의 안전성에 있어 매우 중요한 구조 요소임과 동시에 경제성에 영향을 미치는 요소이다. 따라서, 본 연구에서는 말뚝캡 직상부에 모멘트 집중을 피할 수 있는 말뚝형 기둥의 현장 적용성에 대한 기초적인 사례연구를 수행하였으며, 말뚝 본체의 구조성능보다는 지반의 지지력이 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

주요어 : 교량 하부구조, 고정하중, 활하중, 말뚝형 기둥

1. 서 론

우리나라는 산악지역이 국토의 70% 이상을 차지하고 있어 도로 및 철도건설공사 시 교량 건설공사가 전체 공사비

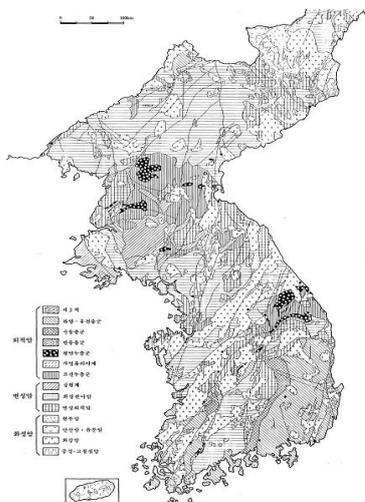


Fig. 1. Mountain - 70% of Korea Peninsula

에서 차지하는 비중이 높아 공사기간을 단축하기 위한 다양한 노력이 진행되고 있다. 대부분의 기술적인 발전은 주로 교량 상부구조에 역점을 두어 발전해 왔다.

교량 하부구조의 범위는 Fig. 1과 같이 하부 지질조건에 따라 직접기초, 깊은기초 등으로 구분한다. 또한, 이러한 하부구조는 Fig. 2와 같이 크게 교대, 교각, 기초로 구분할 수 있다. 교대와 교각은 설계하중, 유량, 하천의 흐름 방향, 기초의 종류에 따라 다르게 적용된다.

교량 하부구조는 교량 상부구조에 작용하는 고정하중과 차량 활하중 등의 수직 방향 하중을 안전하게 지지하여야 한다. 또한, 그 외에 차량 제동하중, 풍하중, 지진하중, 정수압과 유수압, 횡토압, 선박충돌하중, 온도변화나 크리프 및 건조수축에 의한 하중효과 등 횡방향 하중을 지지해야 한다. 따라서 교량 하부구조는 교량 안전성을 확보하는데 있어 매우 중요한 구조 요소이다. 우리나라 교량의 교각은 콘크리트 교각이 주종을 이루고 있으며, 공사비 면에서도 큰 비중을 차지하여 전체 교량의 경제성에 큰 영향을 준다. 교량 상부구조의 경우, 다양한 연구가 진행되어 여러 가지 특허 및 신기술들이 개발되어 현장에서 현장조건들을 고려하

1) Korea Expressway Corp.

† Korea Expressway Corp. (Corresponding Author : ab6317@hanmail.net)

2) Korea Infrastructure Safety Corp.

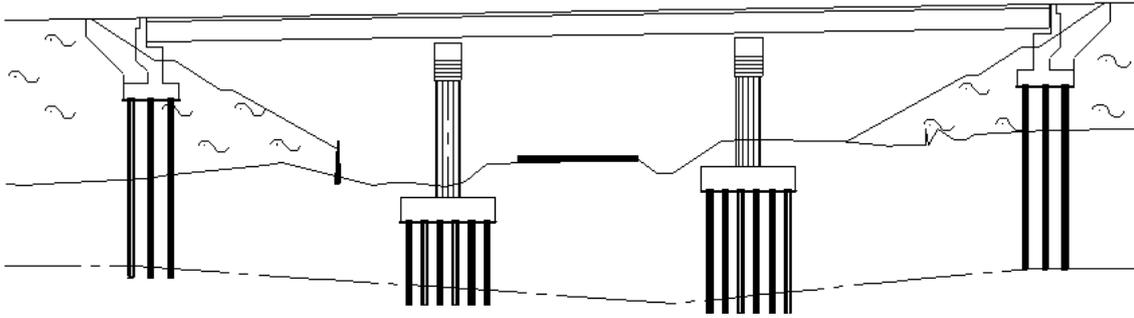


Fig. 2. Bridge Pier and abutment

여 널리 적용되고 있다. 그러나 교량 하부구조의 경우 비교적 최근 들어 대안설계 입찰방식 적용 등에 따라 새로운 하부구조방식에 대한 연구개발들이 이루어지고 있다(한국도로공사, 2008).

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 기둥-말뚝캡-말뚝의 3가지 요소로 구성되는 교각과는 달리 말뚝캡을 설치하지 않고 말뚝과 기둥을 단일부재로 사용하는 교각의 적용성에 대하여 분석하였다.

일반적으로 적용되고 있는 교각구조에 비하여 Fig. 3과 같이 말뚝형 기둥의 경우 말뚝캡 시공이 없으므로 공기 및 공사비에서 기존의 방법보다 경제성이 높고 구조적으로 말

뚝캡 직상부에 모멘트가 집중되는 구조를 피할 수 있는 특징이 있다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 사각 및 팔각의 프리스트레스트 말뚝과 현장타설 말뚝을 이용하여 말뚝캡을 시공하지 않고 말뚝을 지상부로 돌출시켜 교각 코핑부에 직접 연결시키는 말뚝형 기둥의 거동특성을 분석하였다.

2. 말뚝형 기둥 교각의 구조특성 및 적용성

2.1 구조적 특성

일반적으로 확대기초를 사용하는 교량의 교각은 상시 및 내진 설계 시 확대기초 상단과 하단을 구분하여 별도로 각각 기둥 설계 및 기초설계를 수행하고 있다.

이러한 개념은 확대기초 상단 기둥과 하단 말뚝의 강성이 확대기초의 강성에 비하여 매우 작다는 가정에서 출발한 설계방법이다. 그러나 말뚝형 기둥 교각의 경우 확대기초와 같이 큰 강성을 가지는 부재가 존재하지 않으므로 상부구조물의 거동이 말뚝형 기둥 구조물 전체에 영향을 미쳐 기둥 구조와 기초구조를 구분할 수 없으며, 거동 또한 연속적인 거동을 나타낼 것이다. 그러므로 일체형 교각의 설계 시에는 지반의 특성 및 말뚝의 단면 특성 등을 합리적으로 고려

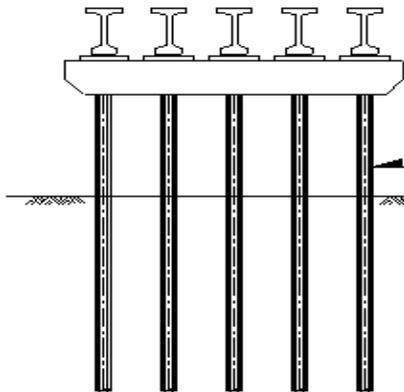


Fig. 3. Pilecolumn



Fig. 4. Rectangular prestressed pile (Application case in USA AASHTO(2007))

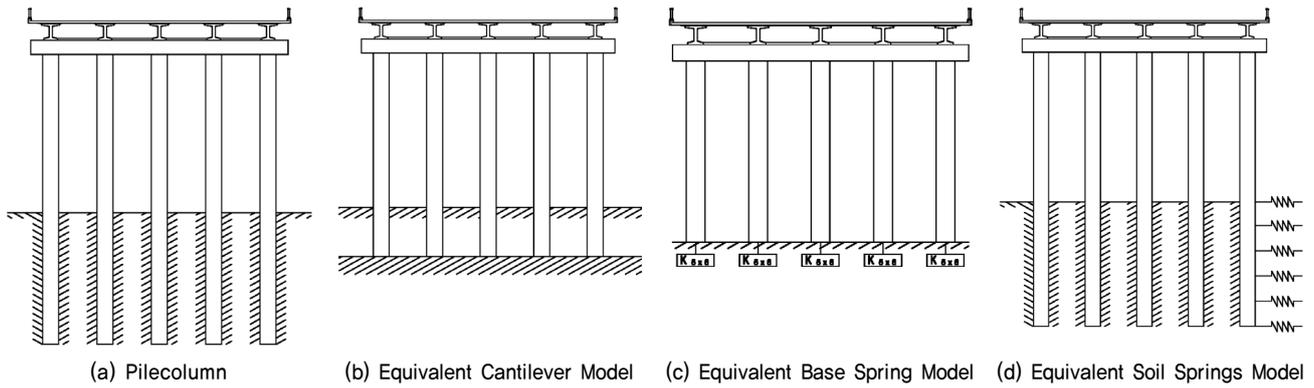


Fig. 5. Methods of modeling pilecolumn

하여 말뚝과 지반 비선형성의 상호관계를 예측하는 것이 신뢰성을 확보하는데 중요하다.

현재 해외에서 적용되고 있는 말뚝형 기둥의 모델링 방법은 3종류가 있다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 본 연구에서 적용한 방법은 등가 지반 스프링 모델이다.

이들 방법들 중 가장 기본적인 방법은 Fig. 5(b)에 나타난 등가 캔틸레버 모델링 방법이며, 캔틸레버 길이는 대략적으로 실제 시스템과 같은 강성을 나타내는 길이로 정해지고 더불어 말뚝 자체의 최대 모멘트를 산정하는데 종종 사용된다. 지상부 기둥과 지중부 말뚝이 같은 직경을 가지는 경우에 실제 조건과 가장 유사한 결과를 보여주며, 이 방법의 단점은 실제 지반의 비선형 특성을 고려하지 못하므로 일반적으로 구조물의 변위는 과소평가하고 부재력은 과대평가하는 경향이 있다.

두 번째 방법은 Fig. 5(c)에 나타난 등가 지반면 스프링 모델링 방법으로 기둥의 바닥에 부착된 스프링의 등가 시스템으로 실제 말뚝형 기둥 시스템을 대신하는 방법이다. 이 방법은 등가 스프링 값을 구할 때 지면에서 말뚝의 변위와 회전 사이의 상호작용을 합리적으로 고려하여 적용할 수 있다. 일반적으로 이 상호작용을 스프링 상수로 나타내기 위해서 6×6 강성 매트릭스가 사용되어야 한다. 즉, 단순한 독립적인 스프링들은 말뚝의 연결된 거동을 모델화하기 위해 충분히 정확하지 않으므로 많은 해석 프로그램이 사용자가 이러한 연결된 스프링 지지를 나타내기 위해 6×6 매트릭스를 사용하도록 하고 있다. 이 방법은 지반 거동이 비선형이라면 수렴될 때까지 반복되어야 하며, 실제 비선형 거동을 나타낼 수 있도록 해야 한다.

세 번째 방법은 Fig. 5(d)에 나타난 등가 지반 스프링 모델 방법이다. 지중부 말뚝이 구조적 모델에 포함되고, 지반은 일정한 간격을 갖는 말뚝과 연결된 스프링으로서 모델화되었다. 이 방법은 이전의 두 방법의 근사적 과정과 달리 직접적으로 말뚝의 합리적인 강성과 내력을 제공한다. 또한,

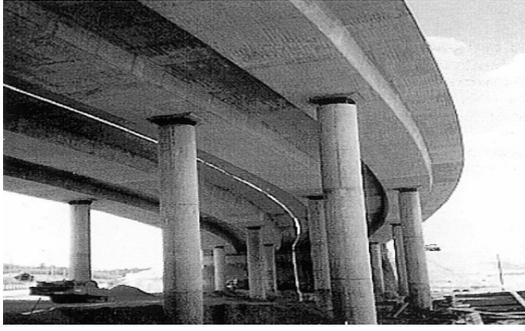
이 방법은 지층의 변화 특성과 지하수가 존재하는 지반에 대해서도 적용할 수 있다. 이 방법의 가장 큰 단점은 지반과 스프링 간의 각 스프링과 말뚝 부분이 분리된 요소들로 모델화되어야 하기 때문에 필요한 해석 시간이 증가하는 것이다.

2.2 말뚝형 기둥의 적용사례

우리나라에서는 프리스트레스트 말뚝형 기둥 교각이 현장에 적용된 사례는 없으며, 유사한 공법으로 원형 기둥교각 형태로 ‘단일 현장 타설말뚝 기초공법’으로 소개가 되어 ‘○○~△△간 고속도로 건설공사’에서 검토한 예가 있다. 또한, ‘인천대교 고가교’구간에 ‘말뚝-기둥 일체형 교각공법’으로 대구경 현장 타설말뚝을 적용한 사례가 있다. ‘단일 현장 타설말뚝 기초공법’과 ‘말뚝-기둥 일체형 교각공법’은 같은 공법으로 우리나라에서는 최근에 이르러 부분적으로 적용되고 있으며, 현재로서는 그 적용실적이 매우 미흡한 실정이다. 말뚝-기둥 일체형 교각 공법에 의한 해외시공 사례는 Fig. 6과 같다.

3. 해외 말뚝형 기둥 교각 기초 설계기준

말뚝형 기둥 교각 기초의 설계에 관한 도로교설계기준, PCI Recommendations 및 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications의 주요 내용을 분석하였다. 도로교 설계기준과 AASHTO LRFD의 관련 규정은 근본적으로 동일하거나 유사하지만, 내진설계 규정의 경우 AASHTO LRFD에서는 내진설계 시 적용하는 응답수정계수가 교량의 중요도에 따라 3가지로 구분되며, 특히 말뚝/기초 및 기둥/코핑 연결부에 대한 철근 상세를 규정하고 있고 내진설계에 대한 철근 상세가 도로교 설계기준보다 구체적이고 엄격하게 규정되어 있다.



(a) Kochertal (Germany)



(b) Lahnstein (Germany)



(c) Nyraný (Czech)



(d) Incheon (Korea)

Fig. 6. Application cases of pilecolumn

3.1 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

3.1.1 말뚝형 기둥 교각 기초 설계 관련규정 - 일반사항 (AASHTO, 2007)

- 압축부재에 대해 철근과 강선에 의한 최대 철근비는 Eq. (1) 이하이어야 한다.

$$- \frac{A_s}{A_g} + \frac{A_{ps} f_{pu}}{A_g f_y} \leq 0.08, \quad \frac{A_{ps} f_{pe}}{A_g f_{ck}} \leq 0.30 \quad (1)$$

- 압축부재에 대해 철근과 강선에 의한 최소 철근비는 Eq. (2) 이상이어야 한다.

$$- \frac{A_s f_y}{A_g f_{ck}} + \frac{A_{ps} f_{pu}}{A_g f_y} \geq 0.135 \quad (2)$$

- 콘크리트 말뚝은 기초 또는 파일 캡에 근입되어야 한다 (최소 300mm 이상, 단 철근이나 강봉으로 연결되는 경우 150mm 이상).
- 말뚝의 주철근은 $1.25f_y A_s$ 에 충분히 저항할 수 있도록 정착되어야 한다.
- 말뚝 단면적
 - 염해가 없는 경우 : 900cm^2 이상
 - 염해가 있는 경우 : $1,420\text{cm}^2$ 이상
- 말뚝의 콘크리트 강도는 35MPa 이상이어야 한다.
- 프리스트레싱에 의한 콘크리트의 압축응력은 5MPa 이상이어야 한다.
- Typical Spiral Reinforcement for Nonseismic Applications
 - a. 말뚝 직경이 600mm 보다 작은 경우

- 나선철근 : MW25 이상, pitch 150mm
- 말뚝 선단부 : 16 turns@75mm pitch, Top 150mm : 5 turns@25mm pitch
- b. 말뚝 직경이 600mm 보다 큰 경우
 - 나선철근 : MW26 이상, pitch 100mm
 - 말뚝 선단부 : 16 turns@50mm pitch, Top 150mm : 4 turns@38mm pitch

3.1.2 말뚝형 기둥 교각 기초 설계 관련규정 - 내진설계

- 철근 콘크리트 말뚝기둥
 - 수직말뚝만 사용한 경우 : Critical(R=1.5), Essential(R=2.0), Other(R=3.0)
- 근본적으로 도로교 설계기준과 동일
- 원형 후프 락철근에 관한 규정 없음(나선철근 사용을 기본전제로 함).
- 철근의 최대 중심 간격은 최소 단면치수의 1/4 또는 100mm 이하이어야 한다.
- Column Connections : 기둥의 심부구속을 위한 횡방향 철근은 기둥 연결부에서 인접부재로 기둥단면 최대치수의 1/2 또는 380mm 중 큰 값 이상의 구간에 연속하여 배근하여야 한다.
- 파일 캡 하단 600mm, 또는 말뚝 직경의 1.5배 중 큰 값 이상인 구간의 나선철근 pitch는 75mm 이하이어야 한다.

3.2 PCI Recommendations

기본적으로 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications와 동일하며, 심부구속을 위한 횡방향 철근량 계산 시 말뚝에 작용하는 축력과 프리스트레싱력을 고려하였다(PCI, 2004).

- 나선철근 비(Seismic Zone 2)

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y} \left(0.5 + 1.4 \frac{P_u + f_{pc} A_g}{f_{ck} A_g} \right) \geq 0.007 \quad (3)$$

3.3 각 기준별 횡방향 철근량 비교

도로교 설계기준과 AASHTO LRFD 및 PCI Recommendations의 기준에 따라 횡방향 철근량을 산정하였다. 말뚝 제원별 횡방향 철근량 비교를 Table 1에 나타내었으며, 횡방향 철근량 비교에 이용된 말뚝의 제원은 사각 80×80, 팔각 90×90 단면이다.

4. 말뚝형 기둥 구조 성능 분석 결과

프리스트레스트 말뚝형 기둥의 구조적 안정성을 검토하

기 위하여 Fig. 7과 같이 상부구조가 3@35m인 3경간 PSC BEAM교를 대상으로 말뚝 형상, 말뚝 길이, 콘크리트 강도 및 말뚝 개수를 변화시키면서 분석하였다.

- 상부구조 형식
 - 교량등급 : 1등급(DB-24 및 DL-24 적용)
 - 구조형식 : PSC BEAM교
 - 교량연장 : 3@35.0m = 105.0m
 - 교량폭원 : 12.455m(2차로)
 - 교량사각 : 90°
 - 곡선반경 : R=∞
 - 내진등급 : 내진1등급교(A=0.154g)

4.1 사각 말뚝

사각 말뚝에 대해서는 Table 2의 제원을 가지는 2가지 경우에 대하여 Table 3, Table 4, Fig. 8, Fig. 9와 같이 분석하였다. 말뚝 본체 허용응력은 도로교 구조설계기준 프리스트레스트 콘크리트면에 있는 허용응력을 기준으로 산출하였다.

$$\text{말뚝 본체의 허용 압축응력} : 0.4 \times f_{ck} \quad (4)$$

$$\text{말뚝 본체의 허용 인장응력} : 0.5 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

Table 1. Comparison of lateral reinforcement volume by standards

Division	Highway Bridge Design Specification(AASHTO LRFD)	PCI
Volumetric ratio of spiral	The larger of $\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_y}$, $\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y}$	The larger of $\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y} \left(0.5 + 1.4 \frac{P_u + f_{pc} A_g}{f_{ck} A_g} \right)$ $\rho_s = 0.007$
Square pile 80×80	H22 @ 55mm ($\rho_s = 0.0441$)	H16 @ 110mm ($\rho_s = 0.0108$)
Octagonal pile 90×90	H22 @ 75mm ($\rho_s = 0.0242$)	H16 @ 100mm ($\rho_s = 0.0107$)

※ Concrete strength : 45MPa, Yield strength of reinforcement(f_y) : 400MPa

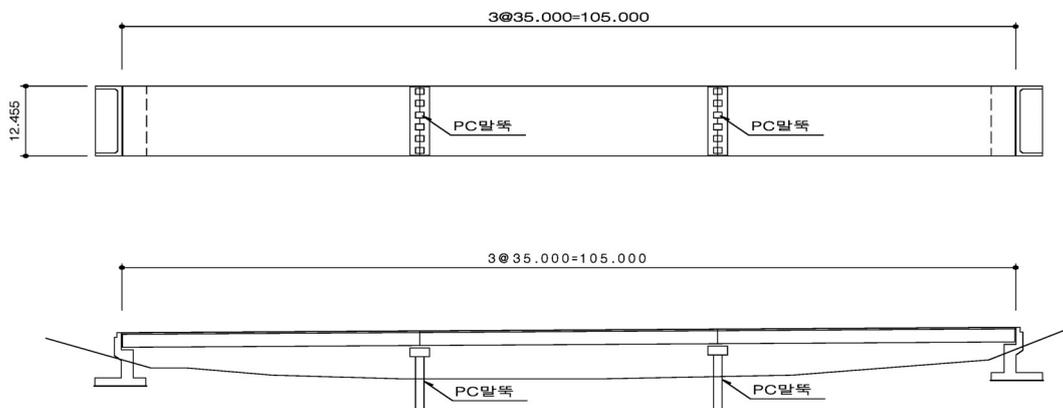


Fig. 7. Profile of PSC BEAM bridge for investigation

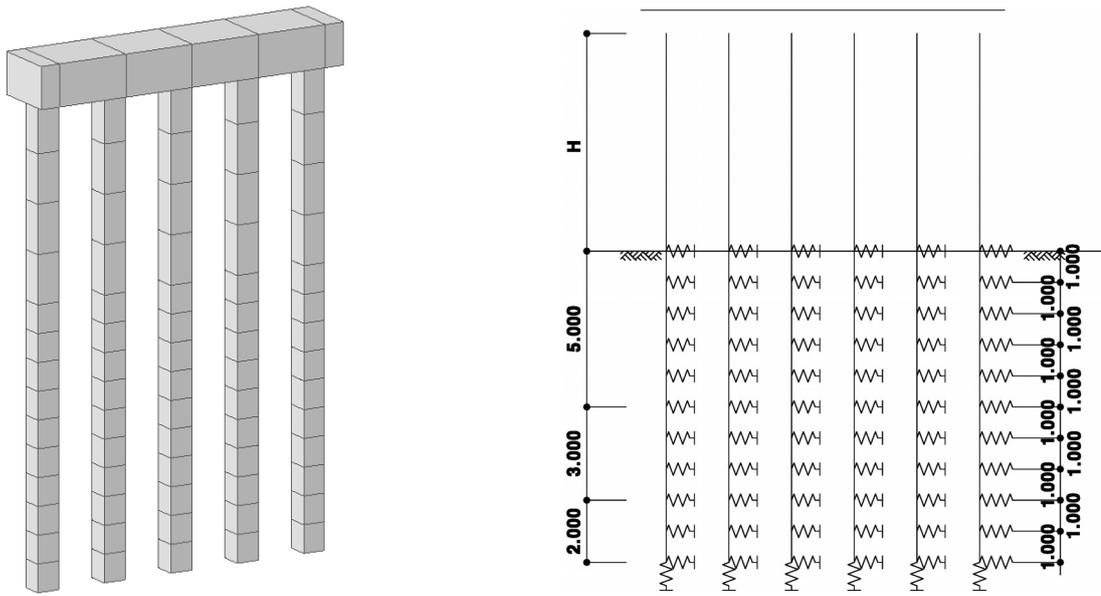
Table 2. Specification of square pile for analysis

	Case 1	Case 2
Concrete strength(MPa)	40	50
Size(mm)	800 × 800	800 × 800
Length(m)	Underground : 10m Above ground : 7m	Underground : 10m Above ground : 10m
The number of pile per pier(EA)	5	5
Prestressed stress(MPa)	5	5

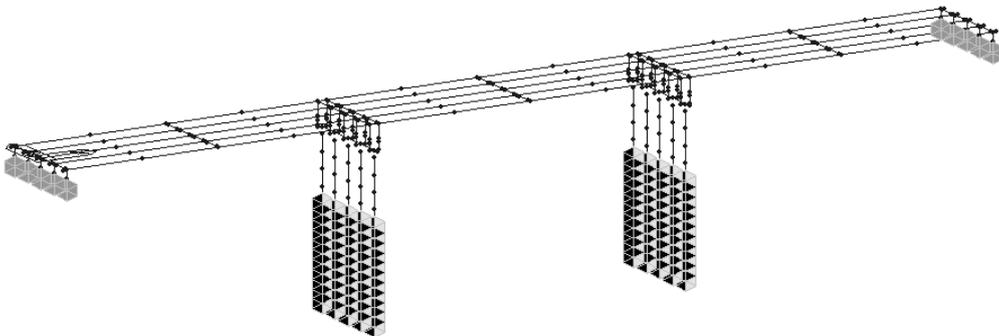
Table 3. The result of Case 1 (Concrete strength 40MPa)

(Unit : MPa)

Load	Compression stress		Remark	Tensile stress		Remark
	Allowable	Maximum		Allowable	Maximum	
Pmax	16.00	12.70	O.K	-3.20	7.10	O.K
Mx,max	16.00	15.03	O.K	-3.20	1.52	O.K
My,max	16.00	13.79	O.K	-3.20	4.47	O.K
Plasticity analysis (Transverse)	24.00	14.45	O.K	-4.80	4.14	O.K
Plasticity analysis (Longitudinal)	24.00	17.16	O.K	-4.80	3.80	O.K



(a) Ambient analysis



(b) Seismic analysis

Fig. 8. Ambient analysis and Seismic analysis (Square pile)

Table 4. The result of Case 2 (Concrete strength 50MPa)

(Unit : MPa)

Load	Compression stress		Remark	Tensile stress		Remark
	Allowable	Maximum		Allowable	Maximum	
Pmax	20.00	14.37	O.K	-3.58	5.72	O.K
Mx,max	20.00	17.16	O.K	-3.58	-0.66	O.K
My,max	20.00	16.50	O.K	-3.58	2.13	O.K
Plasticity analysis (Transverse)	30.00	15.03	O.K	-5.37	3.71	O.K
Plasticity analysis (Longitudinal)	30.00	18.19	O.K	-5.37	2.96	O.K

4.2 팔각 말뚝

팔각 말뚝에 대해서 Table 5의 제원을 가지는 3가지 경우에 대하여 Table 6~8, Fig. 9~11과 같이 분석하였다.

상시 해석을 위하여 교각 1기를 Beam 요소를 이용하여 모델링 하였으며, 지진 시 해석을 위하여 3경간 PSC Beam 교 전체를 모델링 하였다. 각 모델의 지점조건은 도로교 설계기준 하부구조편에 제시되어 있는 수직 및 수평 지반반력

계수를 구하여 탄성 스프링 지점으로 모델링 하였다.

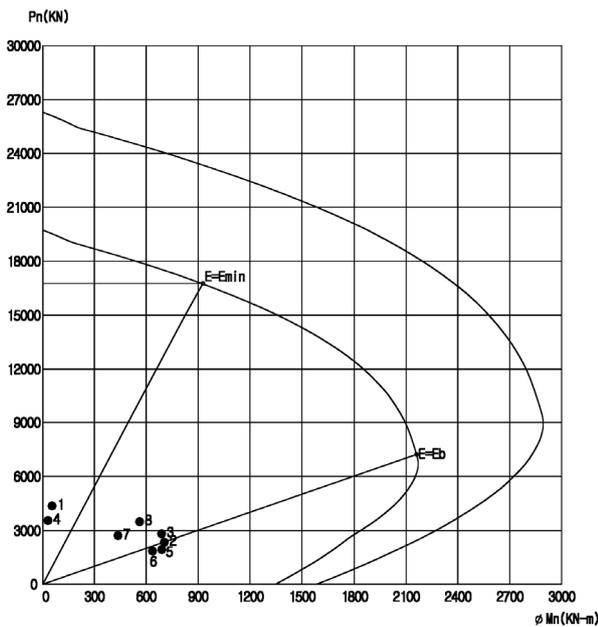
말뚝 본체의 허용응력은 도로교 구조설계기준 프리스트레스트 콘크리트편에 있는 허용응력을 기준으로 산출하였다.

$$\text{말뚝 본체의 허용 압축응력} : 0.4 \times f_{ck} \quad (6)$$

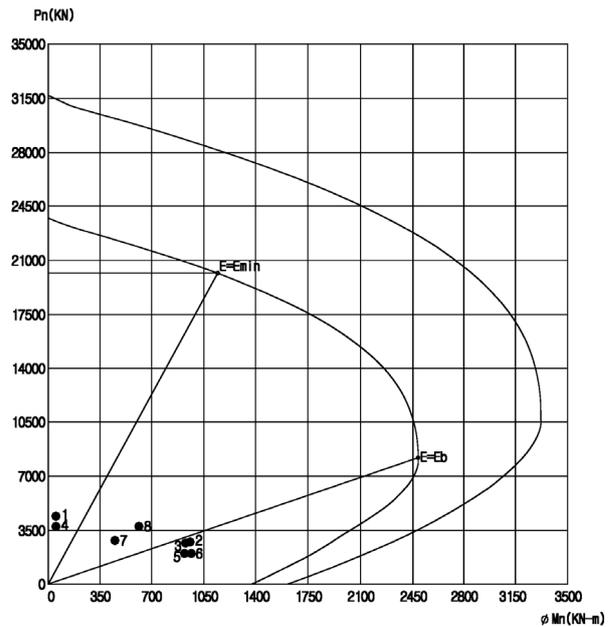
$$\text{말뚝 본체의 허용 인장응력} : 0.5 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (7)$$

Table 5. Specification of octagonal pile for analysis

	Case 1	Case 2	Case 3
Concrete strength(MPa)	50	45	45
Size(mm)	800 × 800(hollow)	900 × 900(solid)	900 × 900(solid)
Length(m)	Underground : 10m Ground : 7m	Underground : 10m Ground : 7m	Underground : 10m Ground : 10m
The number of pile per pier(EA)	5	6	6
Prestressed stress(MPa)	3.85	4.27	4.27

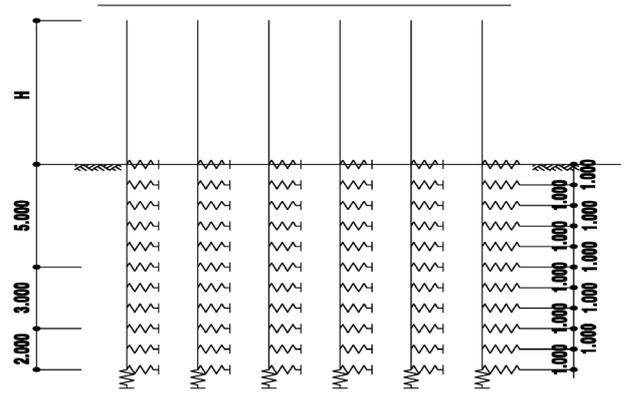
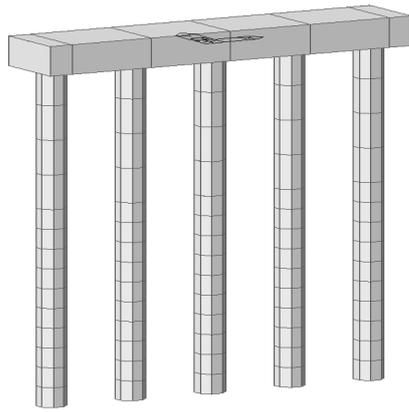


(a) Case 1

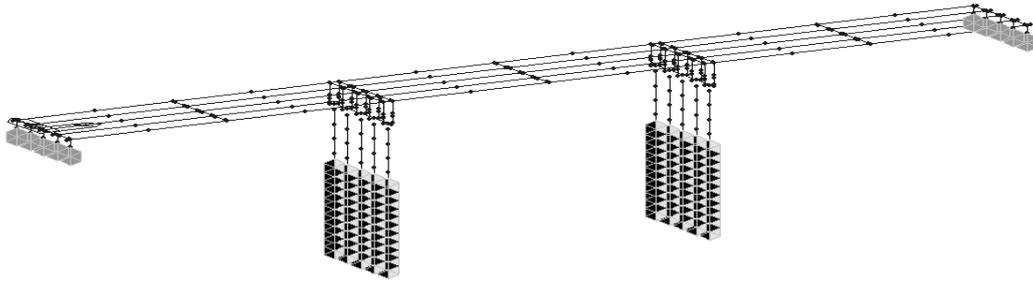


(b) Case 2

Fig. 9. P-M interaction curves (Square pile)

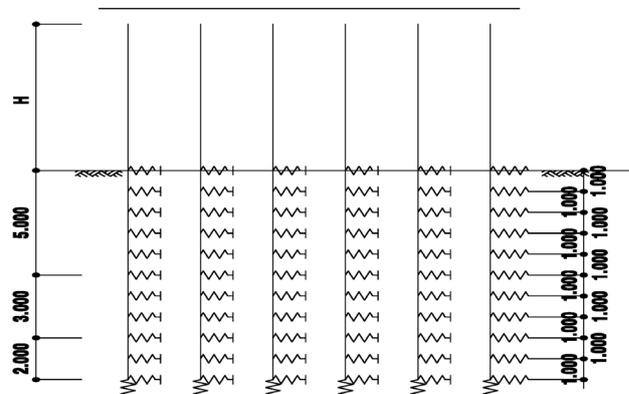
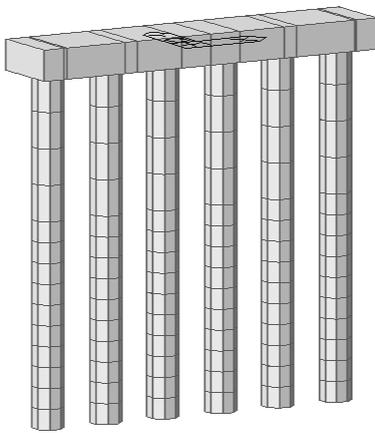


(a) Ambient analysis

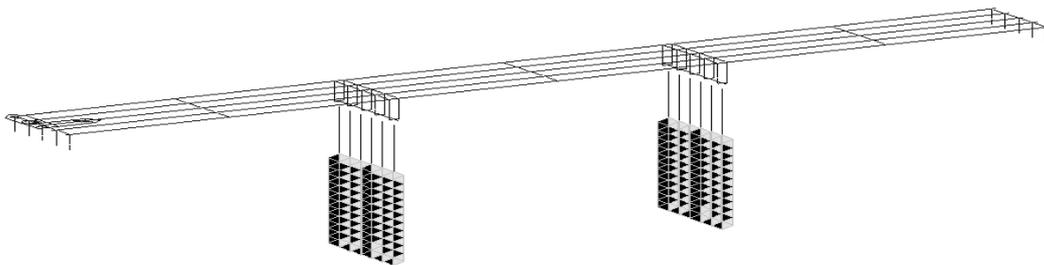


(b) Seismic analysis

Fig. 10. Ambient analysis and Seismic analysis (Octagonal pile, Case 1)



(a) Ambient analysis



(b) Seismic analysis

Fig. 11. Ambient analysis and Seismic analysis (Octagonal pile, Case 2,3)

Table 6. The result of Case 1 (Concrete strength 50MPa, Ground : 7m)

(Unit : MPa)

Load	Compression stress		Remark	Tensile stress		Remark
	Allowable	Maximum		Allowable	Maximum	
Pmax	20.00	16.23	O.K	-3.58	6.48	O.K
Mx,max	20.00	19.08	O.K	-3.58	-1.49	O.K
My,max	20.00	19.08	O.K	-3.58	-1.49	O.K
Plasticity analysis (Transverse)	30.00	18.28	O.K	-5.37	2.36	O.K
Plasticity analysis (Longitudinal)	30.00	21.96	O.K	-5.37	2.11	O.K

Table 7. The result of Case 2 (Concrete strength 45MPa, Ground : 7m)

(Unit : MPa)

Load	Compression stress		Remark	Tensile stress		Remark
	Allowable	Maximum		Allowable	Maximum	
Pmax	18.00	10.51	O.K	-3.39	6.17	O.K
Mx,max	18.00	13.51	O.K	-3.39	0.40	O.K
My,max	18.00	13.51	O.K	-3.39	0.40	O.K
Plasticity analysis (Transverse)	23.94	14.35	O.K	-4.51	1.80	O.K
Plasticity analysis (Longitudinal)	23.94	17.82	O.K	-4.51	1.27	O.K

Table 8. The result of Case 3 (Concrete strength 45MPa, Ground : 10m)

(Unit : MPa)

Load	Compression stress		Remark	Tensile stress		Remark
	Allowable	Maximum		Allowable	Maximum	
Pmax	18.00	12.11	O.K	-3.39	4.84	O.K
Mx,max	18.00	15.52	O.K	-3.39	-1.65	O.K
My,max	18.00	15.52	O.K	-3.39	-1.65	O.K
Plasticity analysis (Transverse)	23.94	15.12	O.K	-4.51	1.18	O.K
Plasticity analysis (Longitudinal)	23.94	19.21	O.K	-4.51	0.10	O.K

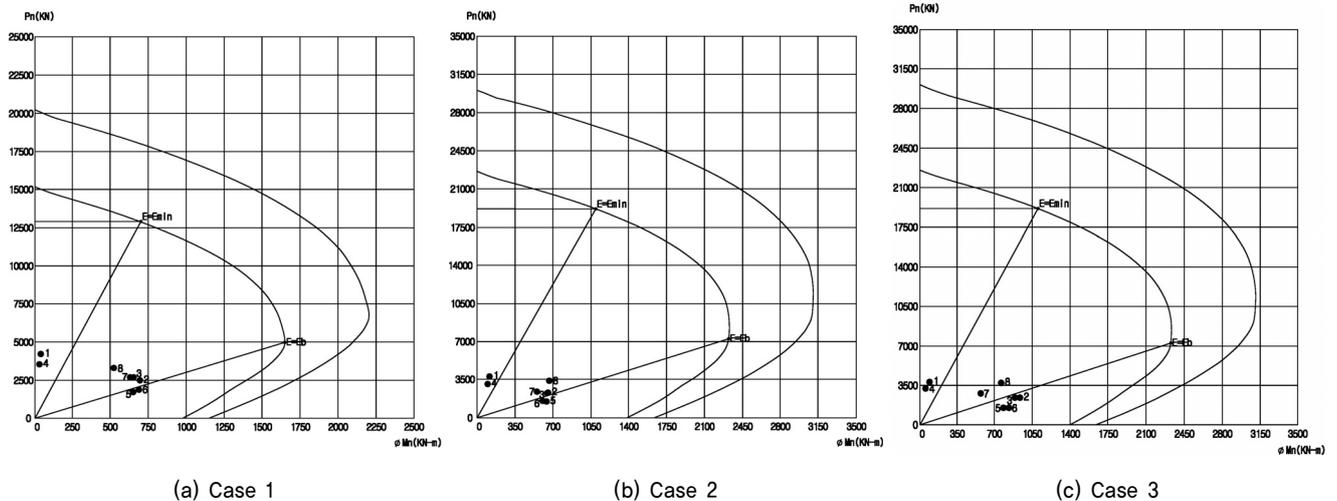


Fig. 12. P-M interaction curves (Octagonal pile)

5. 결 론

일반적으로 우리나라에서 적용하는 말뚝이 있는 교각 기초는 대부분 확대기초가 있는 구조물을 사용하고 있다. 본 연구 대상인 말뚝형 기둥은 일반적으로 사용되는 기둥-확대기초-말뚝의 3가지 요소로 구성되는 교각과는 달리 확대기초를 설치하지 않고 말뚝과 기둥을 단일부재로 사용하는 교각을 말한다. 일반적으로 확대기초가 있는 말뚝기초구조물은 확대기초 시공 시 공기 및 공사비가 추가로 소요되고 있으며, 확대기초 직상부에 모멘트를 집중시켜 구조적으로도 불리한 구조를 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 프리스트레스트 말뚝형 기둥과 현장타설 말뚝형 기둥 교각을 이용하여 말뚝을 지상부까지 돌출시켜 코핑부에 직접 연결시키는 벤트기초 제반 사항에 대하여 설계적인 사항들을 분석하였다. 이를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 프리스트레스트 말뚝형 기둥에 대한 국내·외 설계기준을 비교·검토하였으며, 설계 기준별로 가장 큰 차이를 보이는 횡방향 나선철근량에 대해서는 PCI 기준을 선택하여 적용하였다.

- (2) 프리스트레스트 말뚝 본체에 대한 구조적 성능을 검토하기 위해 말뚝 형상, 재료 강도, 말뚝 긴장력 및 말뚝 길이를 변화시키면서 검토를 수행하였다. 검토 수행 결과 말뚝 본체의 구조 성능보다 지반 지지력이 설계에 가장 큰 영향력을 미치는 것으로 나타났다.
- (3) 말뚝형 기둥 모델링 방법 중 등가 지반 스프링을 이용한 해석 방법에서 등가 지반 스프링 산정방법에 대하여 도로교 설계기준과 FHWA방법 및 Tri-linear 요소를 이용한 p-y 곡선 모사방법에 대하여 분석하였으며, p-y 곡선을 이용한 방법과 가장 유사한 결과를 보이는 방법은 FHWA 방법이였다.

References

1. 한국도로공사 (2008), 사각 프리스트레스트 말뚝형 기둥의 거동실험, pp. 1~48.
2. AASHTO (2007), "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications SI Units 4th Edition", pp. 167~243.
3. PCI (2004), "Bridge Design Manual Chapter 20. Precast Prestressed Concrete Piles", pp. 89~132.