



강관말뚝을 이용한 파일벤트 교각의 거동 해석

Behavior Analysis of Pile-bent Piers Using Steel Pipe Piles

박민철* · 한희수**

Park, Min-Cheol*, and Han, Heui-Soo**

Abstract

Due to the recent earthquake in Korea, interest in the seismic performance of civil structures is increasing rapidly. However, existing concrete abutment has a disadvantage that the seismic performance is weak due to the brittle behavior during the earthquake. In this study, structural analysis was carried out to investigate behavior characteristics of Pile-bent piers using steel pipe piles with ductile behavior and inverse T type pier. As a result of the structural analysis, the axial forces and moments of the member forces generated on the pile foundation were larger for the Pile-bent pier than for the concrete pier and shear force were largely on the concrete pier. pile displacement in the bridge axis was estimated to be about 80 times larger than the static time at the seismic, and the displacement of the pile-bent pier occurred 7 to 8 times larger. the reaction force acting on the bridge support was largely on the concrete pier, and the difference was further increased by seismic analysis. As a result of comparing the total load applied to the pier, the concrete piers were about 4,000 kN larger than the pile-bent pier due to the column and coping part self-weight.

Key words : Pile-bent, Steel Pipe Pile, Pier, Seismic Capacity, Structure Analysis

요 지

최근 들어 발생한 국내 지진으로 인해 토목 구조물의 내진 성능에 대한 관심이 급증하고 있다. 그러나 기존 콘크리트 교대는 내진 시 취성거동을 보여 내진성능이 취약한 단점이 있다. 본 연구에서는 연성거동을 보이는 강관말뚝을 이용한 파일벤트 교각과 기존 콘크리트 교각을 대상으로 구조해석을 수행하여 거동 특성을 검토하였다. 구조해석 수행결과, 말뚝기초에 발생하는 부재력 중 축력과 모멘트는 파일벤트 교각이 콘크리트 교각에 비해 크게 작용되었고, 전단력은 콘크리트 교각이 크게 작용되었다. 교축방향의 말뚝 변위는 지진시가 정적시에 비해 약 80배정도 크게 산정되었고 파일벤트 교각의 변위가 7~8배 크게 발생되었다. 교량받침에 작용하는 반력은 콘크리트 교각이 더욱 크게 작용되었고 내진해석시 그 차이가 더욱 크게 나타났다. 교각에 작용되는 총 하중을 비교한 결과, 콘크리트 교각은 기둥과 코핑부의 자중으로 인해 파일벤트 교각에 비해 약 4,000 kN 가량 크게 작용되었다.

핵심용어 : 파일벤트, 강관말뚝, 교각, 내진성능, 구조해석

1. 서 론

최근 들어 발생한 경주 지진과 포항 지진으로 인해 토목 구조물의 내진 성능에 대한 관심이 급증하고 있다. 그러나 기존 철근 콘크리트 교각은 1995년 발생한 일본의 고베 지진에서 내진 시 그 취약함이 드러났으며, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008)는 강교각을 내진 시 우수한 교각으로 보고하였다. 기존 철근 콘크리트 교각은 PHC말뚝이나 현장타설말뚝을 이용한 말뚝기초와 푸팅, 철

근콘크리트 기둥, 코핑 등으로 구성되어 있으며, 이러한 복잡한 구조부재들로 인해 경제성과 시공성이 떨어지고 소성힌지의 발생으로 인해 내진성능이 취약한 단점을 가지고 있다. 그로인해 2000년도에 들어 이러한 문제점을 개선하고자 말뚝기초와 기둥을 단일부재로 사용하여 시공성과 경제성을 개선한 파일벤트 교각에 대한 시공사례가 급증하는 추세이다. 그러나 기존의 파일벤트 교각은 현장타설말뚝을 이용한 해상 대형교량에 주로 적용되었으며, 단일 현장타설말뚝은 일반적으로 말뚝기초에 적용되는 푸팅을 시공하

*정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사후연구원(E-mail: xlage0@naver.com)

Member, Postdoctoral researcher, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**교신저자, 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-54-478-7618, Fax: +82-54-478-7618, E-mail: hanhs@kumoh.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

지 않고 직경 약 1.0 m~3.0 m의 철근 콘크리트로 기초와 기둥을 연속시공하는 기초로써, 육상교량의 교각에 적용하기에는 시공성과 적용성이 떨어지는 문제점이 있다. 또한 지진시 철근콘크리트 재료의 연성거동을 유도하기 위한 내진성능평가 및 심부구속철근으로 보강이 필요하며, 대구경으로 2개 이내로 시공되기 때문에 말뚝의 성능이 떨어지거나 과도한 침하가 발생할 경우 교량성능에 치명적인 손상을 유발할 수 있다. 그로인해 육상교량에 적용되는 파일베نت 교각의 말뚝기초는 대부분 강관말뚝에 비해 경제성이 우수한 PHC말뚝을 사용하고 있다. 하지만 PHC말뚝은 시공 시 말뚝의 설치 중에 발생하는 인장 균열과 타격 중에 생긴 말뚝 선단부의 파괴, 두부 정리로 인한 파손 및 강연선의 탈락으로 인해 말뚝의 성능이 저하된다. 따라서 육상교량에 적용되는 파일베نت 교각의 말뚝기초로는 부적합한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 현장타설말뚝과 PHC말뚝의 재료적 취약성을 연성도가 뛰어나 내진성능이 우수한 강관말뚝으로 대체하고, 파일베نت 교각의 적용으로 시공성과 경제성을 개선한 강관말뚝을 이용한 파일베نت 교각의 성능을 기존 교각과의 비교를 통해 검증하고자 한다.

파일베نت 교각과 강관말뚝에 대한 연구는 국내외에서 다수 진행된 바가 있다. 국외에서는 FHWA(1987)는 상하부 일체화된 파일베نت 형식 구조물의 경우 교량 말뚝기초를 모델링하는 방법으로 등가 캔틸레버 모델(Equivalent Cantilever Model), 등가 기초스프링 모델(equivalent Base Spring Model), 등가 지반스프링 모델(Equivalent Soil Spring Model)의 3가지 방법을 제시하였고, Wallace et al. (2001)에 의해 cyclic 하중을 받는 파일베نت구조의 실물 실험이 수행되었다. Matsumoto et al. (1995)는 연암층에 관입된 강관말뚝을 대상으로 정재하 시험과 동재하 시험을 수행하였고, Chow et al. (1998)는 조밀한 해양모래에 관입된 강관말뚝에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 국내의 경우 Jeon (2000)에 의해 교량에 적용되는 대구경 현장타설말뚝의 실험적 연구가 수행하였다. Son et al. (2006)은 파일베نت 구조의 횡구속 철근에 의한 최적 설계법 제안, Jeong et al. (2006)은 파일베نت 구조의 수평거동특성에 대한 연구를 수행하였고, Kim et al. (2017)은 토압분리형 일체식 교대 교량에 적용되는 강관말뚝 파일베نت 말뚝기초의 최소근입깊이 산정을 위해 P-y해석을 수행하였다. You et al. (2003)는 강관 말뚝과 푸팅의 연결부에 대한

실험과 해석적 연구를 수행하였고, Kim et al. (2015)은 사질토 지반에서 수평하중에 따른 단일강관말뚝에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

국내의 연구동향을 종합하면 현장타설말뚝을 이용한 파일베نت 교각의 연구 사례와 단일강관말뚝에 대한 연구만 수행되었고 본 연구와 같이 강관말뚝을 이용한 파일베نت 교각의 거동을 해석한 사례는 전무하며, 실제 교량을 모델링하여 구조해석을 수행한 연구 또한 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 기존 역T형 콘크리트 교각과 강관말뚝을 이용한 파일베نت 교각의 거동 특성을 구조해석을 통해 평가하였다. 구조해석은 토목분야 범용프로그램인 MIDAS Civil 2012+를 통해 수행하였고, 상부구조는 한국도로공사의 표준횡단면도(왕복2차로)를 이용하여 교량을 모델링하였다. 파일베نت 교각의 효용성 검증을 위해 대상 교각에 따라 강관말뚝기초에 발생하는 부재력과 변위를 산정하였다. 그리고 말뚝기초의 경우 말뚝과 지반의 상호작용, 지반의 강성 차이로 인해 거동이 지배되므로 이를 정량적으로 평가하기 위해 교량 받침에 작용하는 반력과 교각에 작용되는 총 하중을 비교 검토하였다.

2. 구조해석 조건

2.1 구조부재의 재료특성과 모델링

2.1.1 재료특성

본 연구의 검토대상 교각의 재료특성은 콘크리트와 강재로 구분된다. 상부 PSC거더는 압축강도 40MPa의 콘크리트(C40)이며, 교대와 바닥판은 압축강도 27MPa의 콘크리트(C27)이다. 파일베نت 말뚝기초의 강관말뚝은 강재 STK490이며, 탄성계수는 2.05×10^8 MPa이다(Table 1).

강관말뚝의 제원은 Table 2와 같다. D 는 말뚝의 직경, t 는 강관의 두께, A_p 는 강재의 단면적, t_c 는 강재의 부식두께이며 Structure foundation design standards specification (KGS, 2015)에 제시된 값을 적용하였다. D' 와 d' 은 부식두께를 고려한 강관의 외경과 내경이다. A_p' 는 부식두께를 고려한 강재의 단면적, I' 은 부식두께를 고려한 단면 2차 모멘트이다.

Table 1. Material Property of Structural Analysis

Division	Property					Section
	Korean Standards (KS)	E_c (kN/m^2)	ν	α_c ($1/^\circ C$)	γ (kN/m^3)	
Concrete	C40	2.998×10^7	0.18	1.0×10^{-5}	24.52	Girder
	C27	2.668×10^7	0.18	1.0×10^{-5}	24.52	Plate, Abutment
Steel	STK490	2.05×10^8	0.3	1.2×10^{-5}	76.98	Pile

Table 2. Dimension of Steel Pipe Pile

D	t	A_p	t_c	D'	d'	A_p'	I'
mm	mm	mm ²	mm	mm	mm	mm ²	cm ⁴
508	12	18,699	2	504	484	15,519	57,536

2.1.2 모델링

상부구조의 형상은 한국도로공사의 표준횡단면도(왕복2차로)에서 대칭으로 반 단면만을 검토하였다(Fig. 1). 횡단면도의 길이는 12.22 m이고 교량받침은 5개소이다. 중앙분리대와 난간방호벽이 구성되며, 80 mm의 두께로 아스팔트 포장에 있다. 중앙분리대와 난간방호벽, 아스팔트 포장에 모델링이 되지 않아 프로그램 내에서 사하중으로 자동계산된다. 모델링 결과는 Fig. 2와 같으며, 거더와 교대, 말뚝은 강결되게 모사하였다.

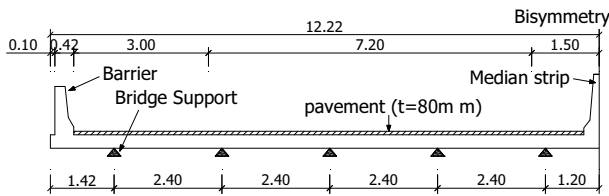


Fig. 1. Cross Sectional View

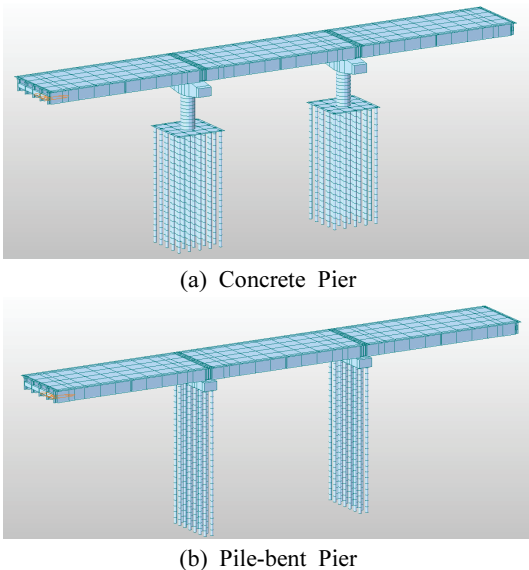


Fig. 2. Structural Analysis Modeling

Table 3은 구조부재와 경계조건의 적용 요소를 나타낸 것이다. 상부구조의 거더는 보요소(*beam element*), 바닥판의 판요소(*Plate element*)로 적용하였으며, 하부구조의 교대와 교각, 말뚝은 보요소로 생성하였다. 경계조건으로 작용되는 지반과 말뚝의 상호작용은 P-y곡선을 Multi-Linear spring으

로 적용하여 지반의 항복거동을 모사하였다, 교각의 교량받침은 Elastic link를 적용하고, Fig. 3과 같이 배치하였다. 교량받침의 규격은 1,350 kN이며 형상은 300(B)×400(L)×89(H)이다. 교량받침의 물성은 Table 4와 같으며, 고정단을 모사하기 위해 전단스프링계수를 매우 크게 적용하여 고정되도록 설정하였다. 또한 고정단은 각 교각의 왼쪽 가운데의 교량받침에만 적용하였다.

Table 3. Application of Structural Members and Boundary Conditions

Division	Structural Member	Element
Superstructure	Girder	Beam
	Plate	Plate
Substructure	Abutment	Beam
	Pire	Beam
	Pile	Beam
Pile-Soil interaction		Multi-Linear spring
Bridge support		Elastic link

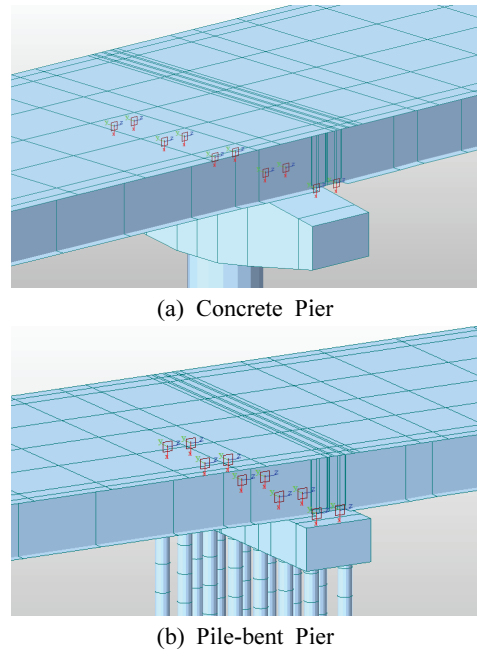


Fig. 3. Arrangement of Bridge Support

2.1.3 말뚝과 지반의 상호작용

말뚝과 지반의 상호작용은 말뚝의 변위(y)와 지반반력(P)의 관계인 P-y곡선을 통해 나타낼 수 있으며, P-y곡선은 심도에 따른 지반 스프링계수 변화를 고려할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 Reese et al. (1974)가 제안한 사질토의 P-y곡선을 적용하였으며, P-y곡선을 모사하기 위한 Multi-Linear Spring 산정에 필요한 수평지반 반력계수(k_h)는 KGS (2015)에

Table 4. Properties of Bridge Support

	Compression spring coefficient (kN/m)	Shear spring coefficient (kN/m)	Allowable displacement at seismic (mm)	Horizontal force at seismic (kN)
Movable end	333.42	1840.0	± 90.0	165.0
Fixed end	333.42	1.0×10^7	± 90.0	165.0
	Z-Axis	X-Axis, Y-Axis		

제시된 Eq. (1)을 이용하였다.

$$k_h = 1.208 \cdot (\alpha \cdot E_0)^{1.10} \cdot D^{-0.310} \cdot (EI)^{-0.103} \quad (1)$$

여기서, α 는 표준관입시험의 N값에서 추정된 변형계수로써 평상시 1, 지진시 2를 적용하고, E_0 은 지반변형계수, D 는 강관말뚝의 직경, EI 는 강관말뚝의 휨강성을 나타낸다.

지반변형계수(E_0)는 일반적으로 KGS(2009)에 제시된 Eq. (2)를 이용하여 산정한다.

$$E_0 = 2800 N(kPa) \quad (2)$$

하지만, Eq. (2)는 지반종류와 무관하게 쓰이며, 산정된 지반변형계수(E_0)는 과다 산정되어 말뚝기초의 수평변위를 과소하게 예측하는 것으로 나타났다(KEC, 2012). 이로 인해 KEC (2012)에서는 성토부에 시공되는 교대의 수평변위 최소화 방안을 제시하며 지반변형계수(E_0)의 산정을 Eq. (3)과 같이 적용하였다.

$$E_0 = 700 N(kPa) \quad (3)$$

Table 5는 수평지반반력계수의 산정결과를 나타낸 것이다. 지반의 강성은 N치 20으로 하여 Eqs. (1)과 (3)을 통해 수평지반반력계수를 산정하였다.

Table 5. Calculated Coefficient of Lateral Earth Pressure

N value	E_0	k_h (kN/m^3)	
		Steel pipe pile	Cast-in-placed pile
20	14,000	16,738	17,117

2.2 하중조건과 해석유형

2.2.1 하중조건

구조해석에 적용한 하중조건은 Table 6과 같다. 사하중은 프로그램 자체에서 중력방향의 가속도와 단위중량 등을 통해 자동으로 재하하게 된다. 산정되는 사하중으로는 교량의 자중, 난간방호벽, 아스팔트 포장($t=80$ mm), 중앙분리대

가 있다. 활하중은 KGS (2015)에서 제시된 이동하중을 재하하였다.

Table 6. Load Condition

Self-weight	Auto calculation	
Barrier		
Median strip		
Asphalt pavement		
Traffic Load	DB : 24	DL : 24
Impact coefficient	15/(40+30)	

2.2.2 해석유형

해석유형은 교대에 작용하는 하중을 고려하여 3가지의 해석을 수행하였다. 자중과 2차 사하중에 대해서는 정적해석을 수행하고 활하중에 대해서는 이동하중 해석을 수행하였다. 또한, 내진성능 파악을 위한 내진해석을 수행하였다 (Table 7).

Table 7. Conditions and Case of Structural Analysis

Analysis Case	Analysis condition
Static Analysis	Self-weight 2nd dead load
Moving Load Analysis	Moving Load
Seismic Analysis	Seismic Analysis

내진설계를 위한 해석법은 KGS (2015)에 제시된 다중모드스펙트럼 해석법을 이용하고 지진하중 적용 시 필요한 계수값은 Table 8과 같다. Fig. 4는 계수값을 적용하여 산정된 설계응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

Table 8. Coefficient for Design Response Spectrum

coefficient	Value
Seismic section coefficient	0.11 (Seismic section I)
Risk coefficient	1.40 (Reproduction cycle 1000 years)
Ground coefficient	1.20 (Ground type II)
Accelerometer coefficient	A : $0.11 \times 1.4 = 0.154$

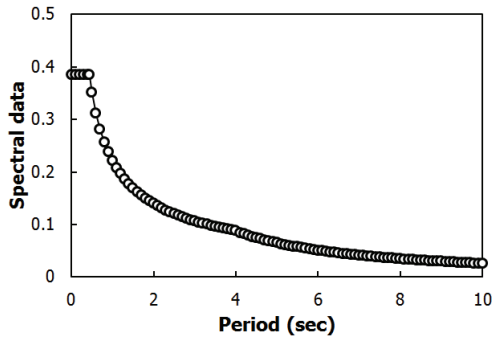


Fig. 4. Design Response Spectrum

3. 구조해석 결과

3.1 콘크리트 교각의 거동 분석

Fig. 5는 정적해석을 통해 산정된 콘크리트 교각 말뚝기초

의 부재력을 나타낸 것이다. Fig. 5 (a)는 말뚝에 작용하는 축력을 나타낸 것이며, 말뚝 두부에는 737.86 kN이 작용되고 하부로 갈수록 말뚝과 지반과의 상호작용으로 인해 축력이 감소되고 18.0 m 지점부터는 축력이 거의 작용되지 않는 것으로 나타났다. Fig. 5 (b)는 전단력을 나타낸 것으로 말뚝 두부에 약 3.8 kN로 작용되었다. Fig. 5 (c)는 모멘트를 나타낸 것으로 말뚝 두부에서 약 4.3 kN·m로 작용되었다.

Fig. 6은 내진해석을 통해 산정된 콘크리트 교각 말뚝기초의 부재력을 나타낸 것이다. Fig. 6 (a)는 말뚝에 작용하는 축력을 나타낸 것이며, 말뚝 두부에서 350.39 kN이 작용되었다. 이는 지진시 발생된 수평력으로 인하여 교각이 회전되고 교각을 지지하기 위해 발생된 축력이다. Fig. 6 (b)는 전단력을 나타낸 것으로 지진시의 수평력으로 인해 말뚝 두부에서 153.54 kN이 작용되었다. Fig. 6 (c)는 모멘트를 나타낸 것으로 말뚝 두부에서 186.48 kN·m이 작용되었다.

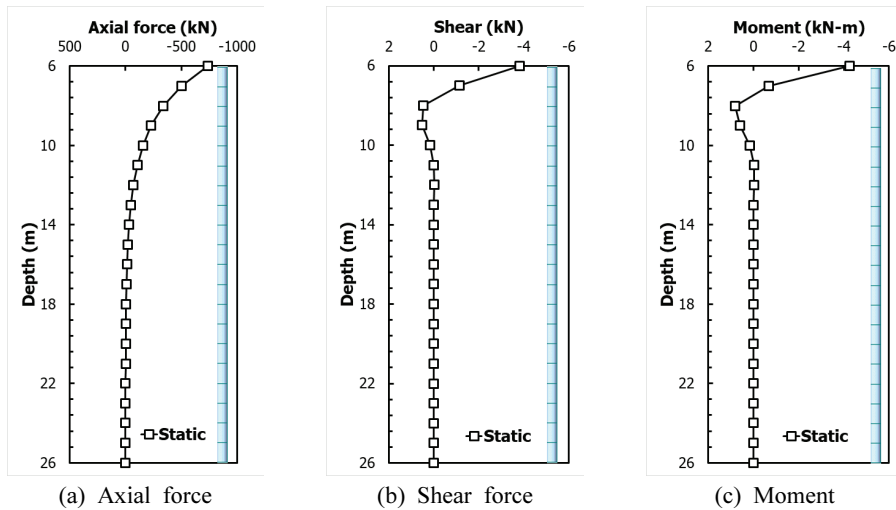


Fig. 5. Member Force Calculated Through Static Analysis

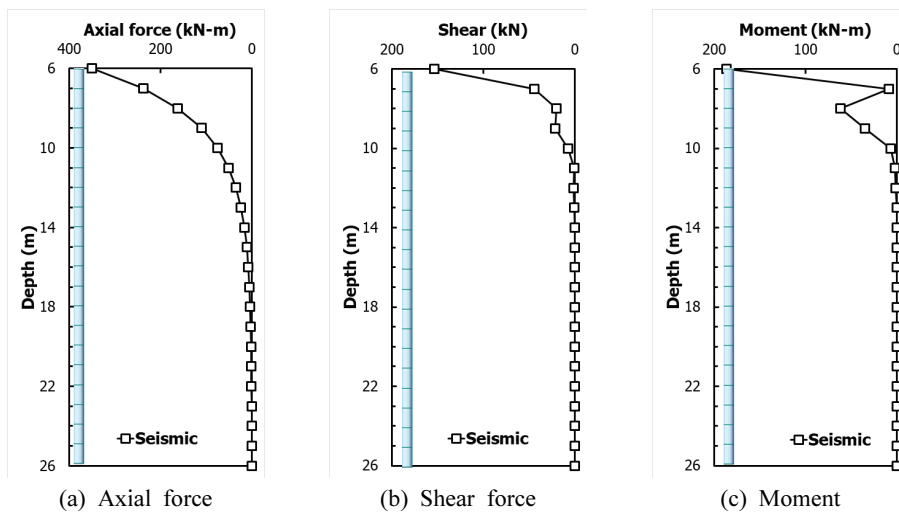


Fig. 6. Member Force Calculated Through Seismic Analysis

Fig. 7은 구조해석을 통해 산정된 교축방향의 말뚝 변위를 나타낸 것이다. Fig. 7 (a)는 정적해석 시 산정된 말뚝 변위이며 말뚝 두부에서 0.21 mm로 작은 변위가 발생되었다. Fig. 7 (b)는 내진해석 시 산정된 말뚝 변위이며 상부구조의 수평력으로 인해 15.3 mm로 상대적으로 큰 변위가 발생되었다.

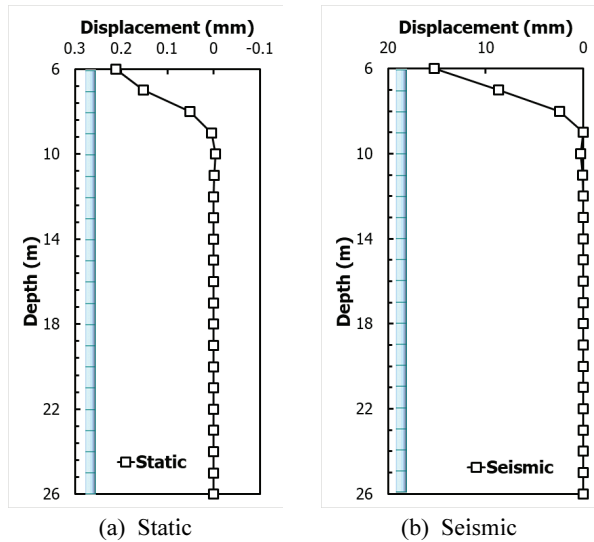


Fig. 7. Pile Displacement of Bridge Axis Calculated by Structural Analysis

3.2 파일벤트 교각의 거동 분석

Fig. 8은 정적해석을 통해 산정된 파일벤트 교각 말뚝기초의 부재력을 나타낸 것이다. Fig. 8 (a)는 말뚝에 작용하는 축력을 나타낸 것이며, 말뚝 두부에는 968.8 kN이 작용되고,

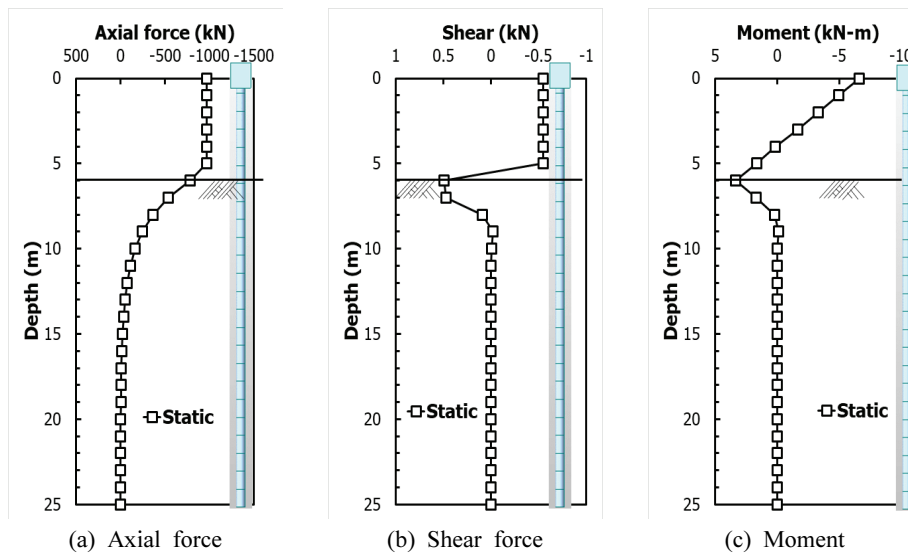


Fig. 8. Member Force Calculated Through Static Analysis

지반과의 상호작용으로 인해 축력이 감소되고 14.0 m 지점부터는 축력이 거의 작용되지 않는 것으로 나타났다. Fig. 8 (b)는 전단력을 나타낸 것으로 파일벤트 말뚝기초가 지반에 돌출된 부분에서 약 0.55 kN으로 작용되었다. Fig. 8 (c)는 모멘트를 나타낸 것으로 말뚝 두부에서 약 6.63 kN · m로 작용되었다.

Fig. 9는 내진해석을 통해 산정된 파일벤트 교각 말뚝기초의 부재력을 나타낸 것이다. Fig. 9 (a)는 말뚝에 작용하는 축력을 나타낸 것이며, 말뚝 두부에서 129.17 kN이 작용되고 정적과 동일하게 지반과의 상호작용으로 인해 감소되다 14.0m 지점부터는 축력이 거의 작용되지 않았다. 정적해석과 달리 내진해석은 지진시의 수평력에 대한 해석이므로 축력은 정적해석보다 작게 작용되었다. Fig. 9 (b)는 전단력을 나타낸 것으로 파일벤트 말뚝기초가 지반에 돌출된 부분에서 약 16.2 kN으로 작용되고 지반에 근입되는 경계부에서 21.63 kN으로 가장 크게 작용되었다. Fig. 9 (c)는 모멘트를 나타낸 것으로 말뚝 두부에서 188.18 kN · m으로 정적해석보다 약 30배정도 크게 작용되었다.

Fig. 10은 구조해석을 통해 산정된 교축방향의 말뚝 변위를 나타낸 것이다. Fig. 10 (a)는 정적해석 시 산정된 말뚝 변위이며 말뚝 두부에서 약 1.7 mm로 작은 변위가 발생되었다. Fig. 10 (b)는 내진해석 시 산정된 말뚝 변위이며 상부구조의 수평력으로 인해 110.6 mm로 상대적으로 큰 변위가 발생되었다.

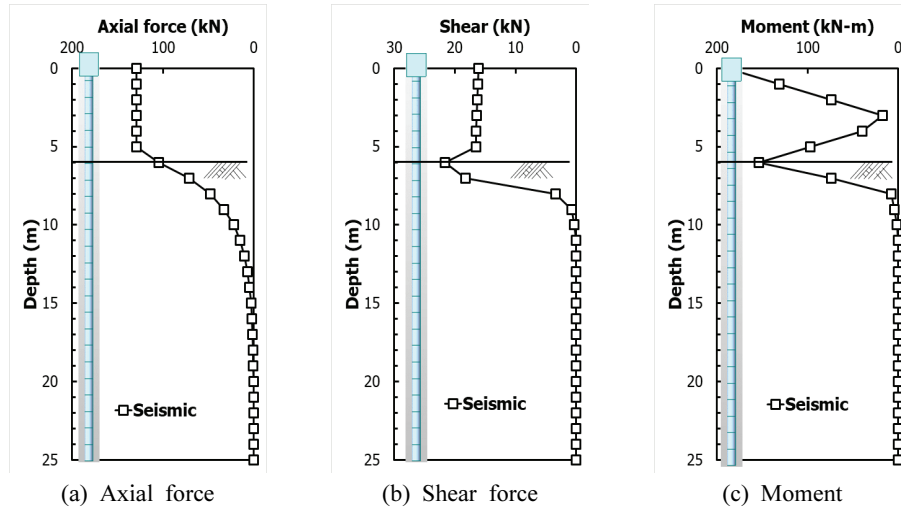


Fig. 9. Member Force Calculated Through Seismic Analysis

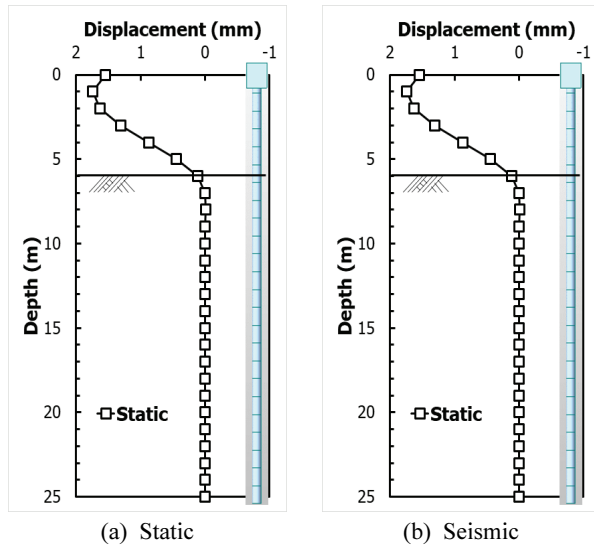


Fig. 10. Pile Displacement of Bridge Axis Calculated by Structural Analysis

3.3 콘크리트 교각과 파일벤트 교각의 성능 비교

3.3.1 교량받침에 작용하는 반력 비교검토

Fig. 11은 정적해석에서 산정된 좌측거더의 교량받침의 반력을 나타낸 것이고, Fig. 12는 우측거더의 교량받침의 반력을 나타낸 것이다. 시점부 교각(P1)에서 교량받침은 총 10개가 설계되며, 좌측거더의 교량받침은 P1-A이고 우측 거더의 교량받침은 P1-B이다. 2.1.2절에서 언급한 바와 같이 가운데 교량받침은 고정단으로 설계하였다. 교량받침의 반력은 강성이 상대적으로 큰 콘크리트 교각이 파일벤트 교각보다 더 큰 반력이 작용되는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 내진해석에서 산정된 좌측거더의 교량받침의 반력을 나타낸 것이고, Fig. 14는 우측거더의 교량받침의 반력을 나타낸 것이다. 내진해석에서 산정된 교량받침의 반력은 콘크리트 교각이 파일벤트 교각보다 더 큰 반력이 작용되고 정적해석보다 그 차이가 더 크게 나타났다. 이는 정적해석결과와 동일한 이유이며, 특히 지진시 발생하는 수평력에 대한 저항성은 파일벤트 교각이 더 우수한 성능을 나타낸다는 것을 의미한다.

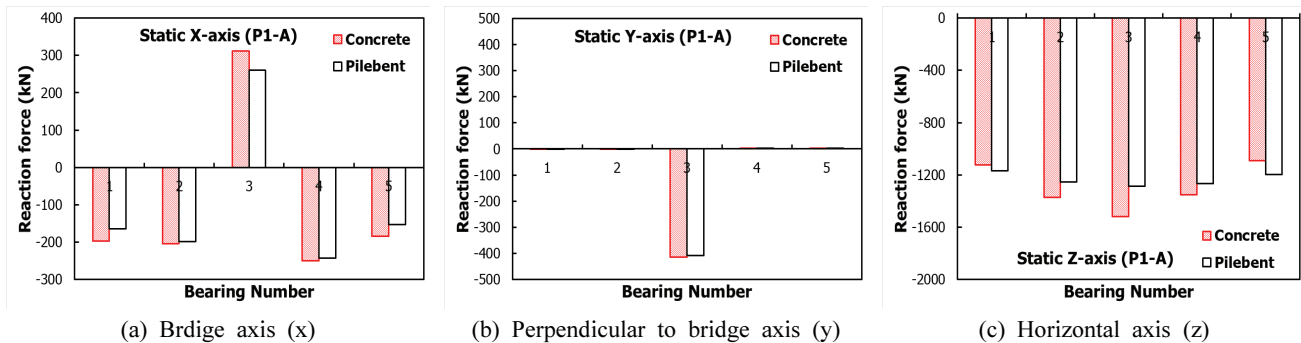


Fig. 11. Reaction Force of Bridge Supports Calculated by Static Analysis (P1-A)

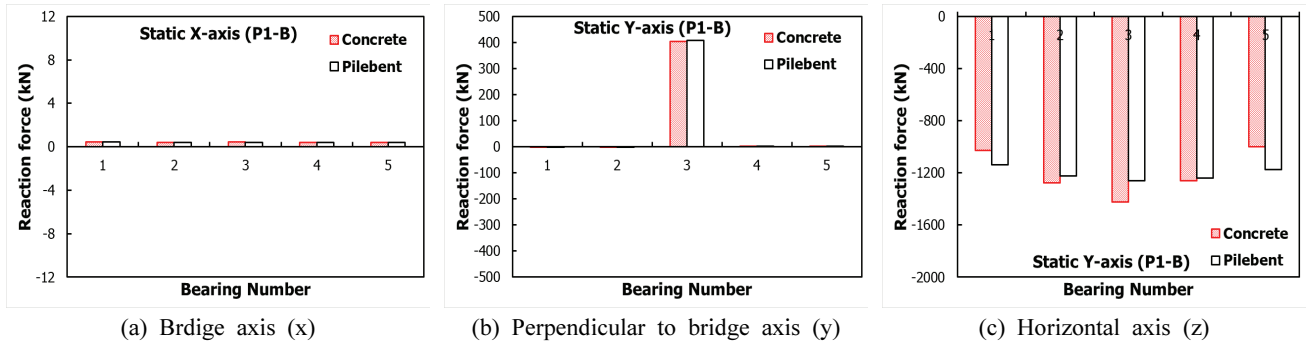


Fig. 12. Reaction Force of Bridge Supports Calculated by Static Analysis (P1-B)

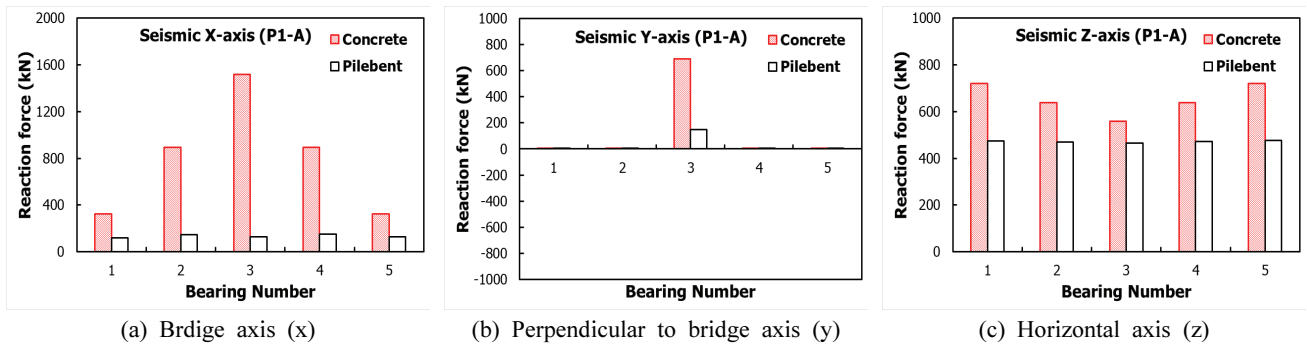


Fig. 13. Reaction Force of Bridge Supports Calculated by Static Analysis (P1-A)

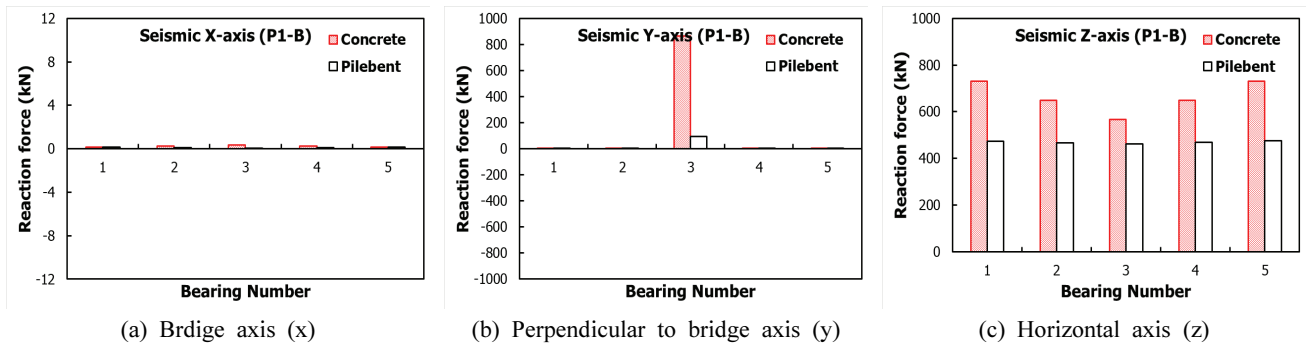


Fig. 14. Reaction Force of Bridge Supports Calculated by Static Analysis (P1-B)

3.3.2 대상 교각에 작용하는 하중 비교검토

Fig. 15는 대상 교각이 받는 하중별 축력의 합계를 나타낸 것이다. 콘크리트 교각에 작용하는 사하중은 13,533 kN이고, 파일벤트 교각에서는 10,366 kN이 작용되었다. 활하중은 콘크리트 교각 1,562 kN, 파일벤트 교각 1,891 kN이 작용되었다. 하중조합계수를 적용한 조합하중은 콘크리트 교각에서 17,643 kN, 파일벤트 교각 13,474 kN이 작용되었다. 콘크리트 교각이 더 큰 축력이 작용되는 이유는 기둥과 말뚝기초의 코핑부 자중이 추가적으로 작용되었기 때문이다.

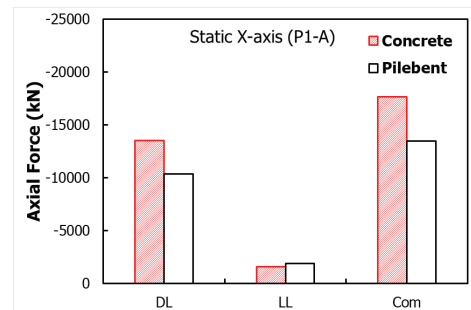


Fig. 15. Sum of Axial Forces by Load Types Acting on the Target Piers

4. 결 론

본 연구에서는 기존 콘크리트 교각과 강관말뚝을 이용한 파일벤프트 교각에 대해 구조해석을 수행하여 거동 특성을 평가하였다. 연구 결과를 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

- (1) 대상 교각의 말뚝기초에 작용하는 축력을 비교·검토한 결과, 정적해석에서는 콘크리트 교각과 파일벤프트 교각 모두 말뚝 두부에서 가장 크게 작용되었고, 하부로 갈수록 지반과의 상호작용으로 인해 축력이 감소되었으며 콘크리트 교각은 18.0 m, 파일벤프트 교각은 14.0 m 지점부터 축력이 거의 작용되지 않는 것으로 나타났다. 내진해석에서는 콘크리트 교각과 파일벤프트 교각의 말뚝기초에 작용하는 축력을 비교·검토한 결과, 지진시 발생된 수평력으로 인하여 교각이 회전되면서 이를 지지하기 위해 말뚝 두부에서 가장 크게 발생하였고, 하부로 갈수록 정적해석과 동일한 양상을 보였다.
- (2) 대상 교각의 말뚝기초에 작용하는 전단력을 비교·검토한 결과, 정적해석에서는 콘크리트 교각은 말뚝 두부에 가장 크게 작용되었고, 파일벤프트 교각은 지반에 돌출된 부분에서 가장 크게 작용되었다. 내진해석의 경우 콘크리트 교각과 파일벤프트 교각의 말뚝기초에 작용하는 전단력을 비교·검토한 결과, 콘크리트 교각은 지진시 발생된 수평력으로 인해 말뚝 두부에서 가장 크게 작용되고, 파일벤프트 교각은 지반에 근입되는 경계부에서 가장 크게 작용되었다.
- (3) 대상 교각의 말뚝기초에 작용하는 모멘트를 비교·검토한 결과, 정적해석에서는 말뚝 두부에서 가장 크게 작용되었고, 내진해석에서는 파일벤프트 교각이 콘크리트 교각에 비해 약 30배정도 크게 작용되었다.
- (4) 대상 교각의 말뚝에 대한 교축방향 변위를 비교·검토한 결과, 대상교각 모두 내진 시 변위가 정적 시 변위에 비해 약 80배정도 크게 산정되었고, 파일벤프트 교각 말뚝의 교축방향 변위가 콘크리트 교각에 비해 정적해석시 약 7배, 내진해석시 약 8배정도 크게 발생되었다.
- (5) 대상 교각의 교량받침에 작용하는 반력을 비교·검토한 결과, 정적해석에서는 상대적으로 강성이 큰 콘크리트 교각이 파일벤프트 교각에 비해 더 큰 반력이 작용되었다. 내진해석 결과 콘크리트 교각에 작용된 교축방향(x)과 교축직각방향(y) 반력은 정적해석에 비해 더욱 크게 작용되었고, 파일벤프트 교각은 대폭 감소한 것으로 나타났다. 이는 지진시 발생하는 수평력에 저항하기에는 파일벤프트 교각이 더 우수한 성능을 보임을 의미한다.
- (6) 대상 교각에 작용하는 하중을 비교·검토한 결과, 콘크리트 교각이 파일벤프트 교각에 비해 약 4,000 kN의 하중이 작용하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 교각의

구조부재인 기둥과 말뚝기초의 코핑부 자중이 추가적으로 작용되었기 때문이다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문임.

References

- Chow, F.C., Jardine, R.J., Bruzy, F., and Nauroy, J.F. (1998) Effects of Time on Capacity of Pipe Piles in Dense Marine Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 3, pp. 254-264.
- FHWA (1987) *Seismic Design and Retrofit Manual for Highway Bridges*. Report No. FHWA-IP87, Federal Highway Administration, National Technical Information Service, Springfield, VA.
- Jeon, G.S. (2000) *Analysis of Vertical and Horizontal Resistance Behavior of Cast-in-situ Concrete Piles in Completely Weathered Granite Gneiss*. Ph.D. dissertation, Seoul National University.
- Jeong, S.S., Kwak, D.O., Ahn, S.Y., and Lee, J.K. (2006) A Study on the Lateral Behavior of Pile-Bent Structures with P- Δ Effect. *Journal of the Korean Geo-technical Society*, Vol. 22, No. 8, pp. 77-88.
- KEC (2012) Evaluation and Improvement of Ride Discomfort at Bridge Approaches in Service, Expressway Transportation Research Institute. (in Korean)
- KGS (2009) *Structure Foundation Design Standards Specification*. Korean Geo-technical Society. (in Korean)
- KGS (2015) *Structure Foundation Design Standards Specification*. Korean Geo-technical Society. (in Korean)
- Kim, D.H., Lee, T.G., and Kim, S.H. (2015) Experimental Study on the Behavior Characteristics of Single Steel Pile in Sand Subjected to Lateral Loadings. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 5, pp. 3548-3556.
- Kim, H.B., Kim, T.S., Park, J.S., Han, H.S. (2017) Analysis of Minimum Penetrated Depth of Pile bent of IPM Bridge. *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol. 18, No. 5, pp. 45-53.
- Matsumoto, T., Michi, Y., and Hirano, T. (1995) Performance of Axially Loaded Steel Pipe Piles Driven in Soft Rock. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 4, pp. 305-315.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008) Design Criteria for Highway Bridges. (in Korean)

Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974) 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.

Son, H. S., Lee, S. H., Cho, I. Sun., Kang, D. O. (2006) Seismic Performance Evaluation of Single Column Drilled Pier Foundation. *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, No. 10, pp. 1782-1785.

Wallace, J.W., Fox, P.J., Stewart, J.P., Janoyan, K., Qiu, T., and Lermite, S. (2001) *Cyclic Large Deflection Testing of Shaft Bridges: Part I-Background and Field*

Test Results. Report to California Department of Transportation.

You, S.K., Park, J.M., Park, D.Y., Kim, Y.H., and Kang, W.H. (2003) The Study on Local Composite Behavior of Connection Member between Steel Pipe Pile and Concrete Footing. *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 2, pp. 288-296.

Received	January 15, 2018
Revised	January 19, 2018
Accepted	February 5, 2018