다지점 가진에 의한 단일형 현장타설말뚝 교량의 지진거동

선 창 호¹ · 안 성 민² · 김 익 현^{3*}

¹울산대학교 건설환경공학부 연구교수, ²건화엔지니어링 철도구조사업부 사원, ³울산대학교 건설환경공학부 교수

Seismic Behavior of a Bridge with Pile Bent Structures Subjected to Multi-Support Excitation

Chang-Ho Sun¹, Sung-Min Ahn² and Ick-Hyun Kim^{3*}

¹Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 44610, Korea

²Staff, Kunhwa Engineering and Consulting, Seoul, 06151, Korea

³Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 44610, Korea

Abstract

It is important to ensure the seismic safety of pile-bent bridges constructed in areas with thick soft ground consisting of various soil layers against seismic motion in these layers. In this study, several synthetic seismic waves that are compatible with the seismic design spectrum for rock sites were generated, and the ground acceleration history of each soil layer was obtained based on ground analyses. Using these acceleration histories, each soil layer was modeled using equivalent linear springs, and multi-support excitation analyses were performed using the input motion obtained at each soil layer. Due to the nonlinear behavior of the soft soil layers, the intensity of the input ground motion was not amplified, which resulted in the elastic behavior of the bridge. In addition, inputting the acceleration history obtained from a particular layer simultaneously into all the ground springs reduced the response. Therefore, the seismic performance of this type of bridge might be overestimated if multi-excitation analysis is not performed.

Keywords : pile-bent bridge, multi-excitation seismic analysis, equivalent linear spring, fiber model

1. 서 론

단일형 현장타설말뚝(single column drilled pier foundation 또는 pile bent structures)은 특수한 형태의 현장타설말뚝으로 확대기초를 시공하지 않고 철근콘크리트로 말뚝과 교각을 연속으로 시공하는 공법(구조물기초설계기준 해설, 2018)이다. 이 공법은 일반적으로 지름이 1.0~4.0m인 대구경 천공 말뚝시공으로 군말뚝공법에 비해 말뚝개수가 적고 기초와의 철근연결 또는 말뚝두부보강 등이 필요하지 않아 시공이 간단하다는 장점이 있다. 또한, 확대기초를 시공하지 않기 때문에 과도한 지반절취가 없으며 다양한 지반조건에 적용이 가능하다.

단일형 현장타설말뚝은 교각단면과 말뚝단면이 동일한 형식

과 교각단면과 말뚝단면이 다른 변단면을 가지는 형식으로 구분한다. 전자의 형식은 교각과 말뚝의 구분이 없으며, 일반적으로 소성힌지는 지표면에서 약 1D~3D 아래에서 발생하는 것으로 보고하고 있다. 후자의 형식은 일반적으로 교각단면보다 말뚝단면이 크기 때문에 교각 하단에서 소성힌지가 발생하게 된다.

이런 단일형 현장타설말뚝은 해외에서는 자주 적용되고 있지만, 국내에서는 2004년 익산-장수 고속도로의 단양교에 시험 시공을 실시한 이후 시공성과 경제성이 우수한 것으로 확인되어 점차 적용성이 증가하는 추세에 있다.

우리나라에서는 2003년 한국도로공사에서 단일형 현장타설말뚝의 설계기준을 제정한 이후, Jeon(2004)이 단일형 현장타설말뚝에 대한 설계방안을 제안하였으며, Son 등(2005)은 단일형 현장타설말뚝의 횡구속 철근에 의한 최적 설계방법을

* Corresponding author:

Tel: +82-52-259-2278; E-mail: ickhyun@ulsan.ac.kr

Received November 8 2019; Revised November 17 2019;

Accepted November 18 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제안하였다. 그리고 Yea(2008)와 Jeon(2000)은 대구경 현장타설말뚝에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 또한, Kim 등(2011)은 단일형 현장타설말뚝의 최소 철근비 적용을 위한 연구를 수행하였고, Ahn 등(2011)은 단일형 현장타설말뚝의 소성현지를 고려한 최적설계법에 대한 연구를 수행하였다. 이와 같이 국내에서도 단일형 현장타설말뚝에 대한 기초적인 연구가 수행되고 있다.

해외에서는 교각과 말뚝이 일체화된 단일형 현장타설말뚝에 대한 연구가 있어 왔으며, 특히 FHWA(1988)에서는 단일형 현장타설말뚝을 모델링하는 3가지 방법(equivalent cantilever model, equivalent base spring model, equivalent soil spring model)을 제시하였다. 이 방법은 우리나라 구조물기초설계기준 해설(2015)에 등가 지반스프링 모델, 등가 고정단 모델, 등가 지반면 스프링 모델로 반영되었다. 이 중 등가 지반스프링 모델은 각 지층의 지반을 탄성스프링으로 모사하여 해석하는 방법으로 수평하중이 작은 경우에는 해석의 정확도가 비교적 높지만, 지진하중과 같이 수평하중이 큰 경우에는 지반반력이 항복에 도달할 수 있으므로 말뚝변위와 지반반력 사이의 비선형성($p-y$ 곡선)을 고려하여 해석을 수행하여야 한다. 이 방법은 지반 층상 구조와 이에 따른 지반 스프링계수의 변화 등을 고려할 수 있는 장점이 있지만 각각의 지반 층상을 대표하는 $p-y$ 곡선 산정이 어려운 단점이 있다. 또한, 연약지반의 깊이가 깊고 지층 구조가 다양한 경우는 지진 시 지층마다 다른 지진파형이 전달된다. 따라서 하나의 단일형 현장타설말뚝에도 지층에 따라 다른 지진파형이 작용하는 다지점 가진(multi-support excitation)에 대한 고려도 필요하지만 이에 대한 연구가 체계적으로 이루어지지 않고 있다. 특히 연약지반이 두껍고 다양한 지층구조를 가진 지반에서는 단일형 현장타설말뚝의 지진거동을 제대로 예측하지 못해 과다설계의 원인이 될 수 있다.

따라서, 이 연구에서는 연약지반이 두껍고 다양한 지층구조를 가진 지반을 대상으로 구조물과 지반의 비선형 상호작용을 고려한 상세해석을 수행하여 지진 시 단일형 현장타설말뚝 교량의 다지점 가진(multi-support excitation)에 의한 영향을 분석하였다.

2. 본 론

이 장에서는 본 연구의 대상교량 및 지층특성을 소개하고 입력지반운동생성, 지반해석, 교량 해석모델링 및 비선형응답이력해석, 다지점 가진의 영향을 분석하는 과정을 나타내고자 한다.

2.1 대상 교량

연약지반의 두껍고 다양한 지층구조를 가진 지반에 위치한 교량의 다지점 가진에 의한 영향을 분석하기 위해 상부구조가 PSC BEAM 형식인 교량을 대상으로 선정하였다. 대상 교량은 Fig. 1과 같이 한 경간의 길이는 50m이며 9개 경간으로 구성되어 총 연장은 9@50m=450m이다. 상부구조를 지지하는 교량받침은 탄성받침으로 구성되어 있으며 하부구조는 역T형 교대와 II형 교각으로 구성되어 있으며 기초는 교각과 말뚝의 단면이 동일한 단일형 현장타설말뚝 형식이다. Table 1은 하부구조의 재료 및 단면특성 값이다.

Table 1 Material and sectional properties of substructure

E_c (Modulus of concrete)	27,515MPa
D(Diameter)	2,500mm
I_g (Moment of inertia of area)	$1.9 \times 10^{12} \text{mm}^4$
I_y (Yielding Effective Moment of Inertia)	$6.9 \times 10^{11} \text{mm}^4$
L(Span length)	50m

2.2 대상 지역 지반특성

대상지역은 연약지반이 두꺼운 부산 낙동강 하구지역을 대상으로 하였으며 지층은 연암층을 포함하여 11개 지층으로 분류되며 지표면에서 기반암까지의 깊이는 약 61.5m로 연약점토층이 약 30m 이상으로 매우 두껍게 분포되어 있다. 이와 같이 기반암 깊이가 50m를 초과하는 지반은 내진설계 일반(KDS 17 10 00 : 2018)에 따라 부지 고유의 특성과약 및 지반응답해석이 요구되는 S_6 지반으로 분류된다. 대상지역의 각 지층 분

Fig. 1 Longitudinal and cross section of bridge considered

포는 Fig. 2와 같으며 지층별 두께 및 전단파속도는 Table 2에 정리하였다. 지층별 전단파속도는 Fig. 3과 같이 연암층을 기준으로 상부로 올라갈수록 지층6(점토질모래층)까지 크게 감소하다가 지층5(자갈질모래층)에서 크게 증가한 후 지층 4(실트질점토층)에서부터 다시 감소하는 특성을 보인다.

Fig. 2. Soil layers

Table 2 Characteristics of soil profile

Soil profile		Depth (m)	Thickness (m)	Unit weight (kN/m ³)	Shear wave velocity (m/s)
1	Low plasticity Clay	2.46	2.46	15.7	150
2	Sand	8.37	5.91	17.1	116
3	Silty Clay	23.13	14.76	15.7	150
4	Silty Clay	36.42	13.29	15.7	162
5	Well graded Sand	39.37	2.95	18.1	345
6	Clayey Sand	42.32	2.95	17.1	195
7	Silty Clay	45.27	2.95	17.1	198
8	Sand	48.22	2.95	15.7	294
9	Weathered soil	57.08	8.86	18.7	453
10	Weathered rock	61.51	4.43	19.6	639
11	Soft rock		-	22.6	639

Fig. 3 Shear wave velocity profile

2.3 입력지반운동 생성

교량이 건설되는 대상지역은 연약점토층이 약 30m 이상이며 기반암까지의 깊이가 50m를 초과하여 부지 고유의 지반응답 해석이 요구되는 S_6 지반으로 분류되기 때문에 암반지반(S_1) 및 토사지반($S_2 \sim S_6$)의 설계응답스펙트럼을 적용한 다중모드 해석의 적용이 어렵다. 따라서 암반지반(S_1)의 설계응답스펙트럼에 부합되는 인공합성 지반운동을 생성하고 지반응답해석을 수행하여 지층별로 가속도 시간이력을 산정하여야 한다. 이때 암반지반(S_1)의 설계응답스펙트럼에 부합되는 인공합성 지반운동은 동시에 작용하는 2개의 성분(교축방향, 교축직각방향)이 하나의 세트(set)로 구성되어야 하며 두 방향의 지반운동은 서로 독립적이어야 하므로 상관계수는 0.16을 초과하지 않아야 한다.

따라서 이 연구에서는 암반지반(S_1)의 설계응답스펙트럼에 부합되는 총 14개의 인공합성 지반운동(EQ1~EQ14)을 생성하여 두 방향으로 서로 독립적인 총 7세트의 입력지반운동을 구성하였다. 인공합성 지반운동의 크기는 재현주기 1000년에 해당되는 0.154g이며 Table 3과 같이 규모 5.5~6.0에 해당되는 지진지속시간을 갖는다.

Table 3 Excitation duration time

Magnitude	Accending duration(t_r)	Strong motion duration(t_m)	Descending duration(t_d)
5.5~6.0	1.0	5.5	8.0

Fig. 4는 총 7세트 중 첫 번째 세트인 EQ1과 EQ2의 인공합성 지반운동 시간이력(점선은 지진지속시간)과 암반지반(S_1)의 설계응답스펙트럼의 부합성 및 상관성을 나타낸 것이다.

Fig. 4 Synthetic seismic waves

2.4 지반응답해석(부지응답해석)

대상지역과 같이 연약지반이 두꺼운 부지에 시공되는 단일형 현장타설말뚝은 여러 지층을 통과하여 암반에 지지된다. 그리고 지진발생 시 암반에 작용하는 지진파는 각 지층을 통과하면서 지층의 특성에 따라 가속도 시간이력이 변화하게 된다. 이와 같이 특성이 다른 여러 지층을 관통하는 단일형 현장타설말뚝 교량의 지진해석은 지반응답해석을 통해 각 지층별로 산정된 가속도시간이력을 해당 지층에 입력하는 다지점 가진 응답이력해석이 필요하게 된다.

따라서 이 연구에서는 2.3절에서 생성된 총 14개의 인공합성 지반운동(EQ1~EQ14)을 기반암에서의 입력지반운동으로 하여 Table 2의 지층에 대해서 Shake2000으로 지반응답해석을 수행하였다. 1개의 인공합성 지반운동에 대해서 기반암을 포함한 총 11개의 지층에 대해서 각각의 가속도 시간이력이 산정

Fig. 5 Distribution of max. ground accelerations at each soil layer

Table 4 Range of max. ground accelerations

Layer No.	Range Max. Ground Acceleration
1	0.118g~0.152g
2	0.113g~0.147g
3	0.097g~0.133g
4	0.097g~0.116g
5	0.098g~0.134g
6	0.093g~0.127g
7	0.151g~0.202g
8	0.133g~0.172g
9	0.133g~0.158g
10	0.117g~0.141g
11	0.107g~0.136g
outcrop	0.156g~0.195g

Fig. 6 Acceleration history at each layer

된다. 따라서 지반응답해석을 통해 기반암을 포함한 11개의 지층에서 인공합성 지반운동(EQ1~EQ14)별로 14개의 가속도 시간이력이 산정되며 총 154개의 가속도 시간이력을 생성하였다.

Fig. 5는 각 지층별 최대지반가속도 분포를 나타낸 것으로 No.7 지층까지는 지반가속도가 증가하고 있으며 No.6 지층에서는 지반가속도가 급격히 감소하고 상부지층(Layer No.5~No.1)에서는 상대적으로 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이에

따라 지표면에서의 최대지반가속도는 0.118~0.152g의 분포 특성을 보이며, 최대지반가속도가 가장 크게 나타나는 No.7 지층에서는 0.151~0.202g의 분포특성을 보인다(Table 4).

Fig. 6은 14개의 인공합성 지반운동 중 EQ1에 대한 지반 응답해석 결과로 생성된 각 지층의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다.

2.5 교량 해석을 위한 지반스프링 모델

단일형 현장타설말뚝이 있는 교량의 다지점 가진 해석을 위해서는 기반암을 포함한 11개의 지층에 2.4절에서 생성된 가속도 시간이력을 입력하여야 한다. 이를 위해서는 각 지층을 지반의 비선형 특성을 고려한 등가선형스프링으로 모델화해야 한다.

각 지층을 등가선형스프링으로 모델화하기 위해서 2.4절의 지반응답해석을 통해 산정된 각 지층에서의 최대 전단변형률(γ_{max})의 2/3(≈ 0.65)를 유효 전단변형률(γ_{eff})로 하여 이에 상응하는 전단탄성계수(G)를 구하였다. 다음으로 식 (1)과 같이 전단탄성계수와 전단파속도와와의 관계식을 이용하여 전단파속도를 구하고 Ohsaki 등(1973)의 식 (2)~(4)를 이용하여 N 치(표준관입시험값)를 구하였다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (\rho \text{는 흙의 밀도}) \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{(6370/\rho)} N^{0.47} \text{ for Sandy soils} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{(11854/\rho)} N^{0.33} \text{ for intermediate soils} \quad (3)$$

$$V_s = \sqrt{(13720/\rho)} N^{0.306} \text{ for Clayey soils} \quad (4)$$

다음으로 등가선형스프링으로 모델화하기 위한 수평지반반력계수(k_h)는 구조물기초설계기준 해설(2018)에 따라 식 (5)를 이용하였다.

$$k_h = k_{h0} \left(\frac{1}{0.3} \times B_H \right)^{-\frac{3}{4}} \quad (5)$$

여기서, B_H 는 하중 작용방향에 직교하는 기초의 환산재하폭(m)으로 말뚝기초의 환산재하폭($B_H = \sqrt{D/\beta}$)을 사용하였다. 환산재하폭 계산시 β 는 기초의 특성치로서 식 (6)을 이용하여 산정하였다.

$$\beta = \left(\frac{k_h D}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

여기서, D 는 하중작용방향에 직교하는 기초의 재하폭(m)이며 E , I 는 단일형 현장타설말뚝의 탄성계수와 단면2차모멘트이다.

그리고 식 (5)에서 k_{h0} 는 지름 30cm의 강체 원판에 의한 평판재하시험에 의한 값에 상응하는 수평지반반력계수(kN/m^3)로서 식 (7)을 이용하여 구하였고, 이때 α 는 2.0(지진시)을 적용하고, $E_0 = 2,800N$ 을 사용하였다.

$$k_{h0} = \left(\frac{1}{0.3} \times \alpha \times E_0 \right) \quad (7)$$

위와 같이 총 14개의 입력지반운동(EQ1~EQ14)에 대해서 지반응답해석을 수행하고 식 (5)를 이용하여 수평지반반력계수(k_h)를 계산하였다. 이렇게 구한 수평지반반력계수(k_h)에 말뚝 직경을 적용하여 계산한 지반스프링모델을 각 지층별로 정리하면 Table 5와 같다.

그리고 입력지반운동(EQ1~EQ14)의 특성에 따라 지층별 지반스프링모델이 차이가 있지만 모든 경우에 대해 교량을 해석하기는 현실적으로 어렵다. 따라서 이 연구에서는 Table 6과 같이 총 14개의 입력지반운동(EQ1~EQ14)에 의해 계산한 지층별 지반스프링모델의 평균값을 적용하였다.

Table 5 Equivalent soil springs

Layer No.	Spring coefficient(kN/m)													
	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14
1	28,670	28,670	28,670	22,430	22,430	22,430	22,430	22,430	22,430	22,430	22,430	28,670	22,430	22,430
2	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883
3	16,345	10,463	1,6345	16,345	16,345	10,463	16,345	10,463	16,345	16,345	10,463	10,463	16,345	10,463
4	16,345	16,345	1,6345	16,345	16,345	16,345	16,345	16,345	16,345	16,345	16,345	16,345	16,345	16,345
5	124,500	124,500	117,313	131,728	131,728	131,728	131,728	117,313	138,990	124,500	124,500	131,728	124,500	131,728
6	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883	10,463	4,883	4,883	10,463	4,883	4,883	4,883	4,883	4,883
7	35,035	35,035	2,8670	35,035	35,035	35,035	35,035	35,035	35,035	35,035	35,035	35,035	35,035	35,035
8	82,013	88,978	82,013	95,995	95,995	95,995	103,058	88,978	95,995	95,995	95,995	88,978	95,995	95,995
9	243,793	259,158	236,140	259,158	259,158	266,873	274,610	251,465	266,873	259,158	259,158	251,465	259,158	259,158
10	1,395,850	1,413,820	1,386,875	1,413,820	1,413,820	1,422,813	1,422,813	1,404,833	1,422,813	1,413,820	1,413,820	1,404,833	1,413,820	1,413,820

Table 6 Average of soil spring coefficients

Layer No.	Average of soil spring coefficients(kN/m)
1	24,213
2	4,883
3	13,824
4	16,345
5	127,606
6	5,680
7	34,580
8	92,998
9	257,523
10	1,411,255

2.6 교량 비선형해석 모델

교량은 기본적으로 비선형해석을 목적으로 하지 않는다면 탄성부재로 모델화한다. 그러나 큰 지진에 의해서 주요 부재가 소성거동을 한다면 이를 모사할 수 있도록 비선형 요소로 모델화해야 한다. 대상교량의 경우는 단일형 현장타설말뚝으로 교각과 기초가 일체로 되어 있고 큰 지진력에 의해서 소성거동을 할 가능성이 크다. 다만, 단일형 현장타설말뚝의 경우는 지반 특성에 따라 소성현상의 발생위치를 예측하기가 어렵다. 따라서 이 연구에서는 말뚝부재를 비선형거동이 모사되는 파이버(fiber) 모델을 사용하여 모델화하였다.

파이버 모델은 교각을 여러 개의 파이버 다발로 구성된 것으로 가정하며 각각의 파이버에 콘크리트와 철근의 비선형 응력-변형률 모델을 적용하면 구조물 전체의 비선형 거동 특성을 표현할 수 있다. 콘크리트 응력-변형률 모델은 Kent와 Park(1971), Sheikh 등(1982), Mander 등(1988), Sastcioglu-Razvi (1992), Hoshikuma 등(1997)에 의해서 제안된 바 있다. 이 연구에서는 Fig. 7과 같이 비구속 및 구속 콘크리트에는

Fig. 7 Fiber model for pile bent structure

Mander 등(1988) 모델을 적용하였으며, 철근의 응력-변형률 곡선은 Menegotto 등(1973) 모델을 적용하였다.

그리고 Fig. 8과 같이 대상지반은 2.5절에서 구한 지반스프링을 등가스프링요소로 모델화하여 말뚝의 교축 및 교축직각방향으로 부착하였고, 입력지반운동은 2.4절의 지반응답해석을 통해 산정한 각 지층별 가속도 시간이력을 교축방향과 교축직각방향(1set)으로 동시에 입력하였다. 동일한 방법으로 총 7세트의 입력지반운동에 대해 다지점 가진 비선형응답이력 해석을 수행하였다. 해석결과 고유주기는 1차모드에서 2.21sec로 나타났으며 70차 모드에서 모든 방향의 질량참여율이 90% 이상을 확보하는 것으로 나타났다.

상부구조와 하부구조가 연결되는 교량받침은 Fig. 9와 같이

Fig. 8 Soil spring model and input motions

Fig. 9 Elastic bearing model

Table 7 Stiffness of Elastic bearing

Elastic bearing	SDx(kN/m)	SDy(kN/m)	SDz(kN/m)
Pile bent	623,265	2,250	2,250
Abutment	568,100	1,876	1,876

탄성받침으로 모델링하였으며 탄성받침의 특성값은 Table 7에 나타내었다.

2.7 다지점 가진 비선형 응답이력해석 결과

총 14개의 입력지반운동(EQ1~EQ7)으로부터 지반응답해석을 통해 생성된 각 지층의 가속도 시간이력을 교축방향과 교축직각방향을 1set로 동시입력하여 다지점 가진 비선형 응답이력해석을 수행하였다. 그 결과 각 부재에 발생하는 최대응답을 구하여 교량의 다지점 가진에 의한 거동특성과 이에 따른 내진성능을 분석하였다.

다지점 가진에 의한 응답이력해석 결과, 교축방향 최대모멘트의 크기는 16,360kN·m이며 발생위치는 P3과 P6교각에서

지표면 아래 1D~3D 근처에서 발생하였고, 교축직각방향으로는 P3교각에서 코핑부와 기둥이 접합되는 부분에서 최대모멘트가 발생하였으며 크기는 13,156kN·m이다. Fig. 10과 Fig. 11은 교축방향과 교축직각방향의 최대모멘트 발생 위치와 다지점 입력지반운동에 의한 모멘트 응답이력을 나타낸 것이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 교축방향과 교축직각방향의 최대전단력 발생 위치와 다지점 입력지반운동에 의한 모멘트 응답이력을 나타낸 것이다. 교축방향 최대전단력의 크기는 1,972kN이며 발생위치는 P8교각의 말뚝하단부에서 발생하였고, 교축직각방향으로는 동일한 위치에서 최대전단력이 발생하였으며 크기는 1,723kN이다. 교각(D=2.5m)의 콘크리트에 의한 공칭전단강도는 6,449kN으로 전단에 대해서는 충분한 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

연약지반이 두껍고 다양한 지층구조를 가진 지반특성을 반영한 단일형 현장타설말뚝 교량에 대해 다지점 가진 응답이력해석결과 Fig. 14와 같이 지진하중에 의한 최대모멘트(16,360

Fig. 10 Moment response in longitudinal direction

Fig. 12 Shear response in longitudinal direction

Fig. 11 Moment response in transverse direction

Fig. 13 Shear response in transverse direction

Fig. 14 Moment-curvature of pile bent

kN·m)는 비선형 단면해석을 통해 구한 초기항복 모멘트 (17,750kN·m)를 초과하지 않아 전체적으로 탄성거동을 하는 것으로 나타났다.

2.8 입력지반운동의 차이에 따른 지진거동 비교

입력지반운동의 차이에 따른 다지점 가진이 단일형 현장타설말뚝 교량의 지진거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 2.4 절에서 구한 각 지층별 가속도와 2.5절에서 구한 지반스프링 모델을 이용하여 Table 8과 같이 12개 케이스에 대해 비선형

Table 8 Analysis cases

CASE	Input motions
1	Each input motion at layers considered
2	Same input motion derived at layer No1
3	Same input motion derived at layer No2
4	Same input motion derived at layer No3
5	Same input motion derived at layer No4
6	Same input motion derived at layer No5
7	Same input motion derived at layer No6
8	Same input motion derived at layer No7
9	Same input motion derived at layer No8
10	Same input motion derived at layer No9
11	Same input motion derived at layer No10
12	Same input motion derived at layer No11

Table 9 Max. moments and ratios

CASE	Max moment(kN·m)	Ratio to CASE1
1	16,326.9	1.00
2	15,184.9	0.93
3	15,106.1	0.93
4	13,710.8	0.84
5	12,358.3	0.76
6	9,806.8	0.60
7	9,598.0	0.59
8	8,980.6	0.55
9	8,728.4	0.53
10	8,356.2	0.51
11	7,832.0	0.48
12	7,726.1	0.47

Fig. 15 Location of max moment

Fig. 16 Moment responses of each analysis case

응답이력해석을 수행하였다. Table 9에서 CASE1은 2.7절에서 수행한 각 지층별로 입력지반운동을 다르게 고려한 다지점 가진 해석이며, 나머지 CASE2~CASE12는 2.4절의 지반응답해석을 통해 구한 해당 지층의 가속도 시간이력을 모든 지층에 동일하게 입력한 케이스이다.

모든 케이스의 모델링 및 해석방법은 2.4절~2.6절의 방법으로 동일하며 비선형 응답이력해석 결과 Fig. 15와 같이 교축 방향으로 모두 동일한 위치인 P6교각에서 지표면 아래 1D~3D 근처에서 최대모멘트가 발생하였다.

Fig. 16은 각 케이스(CASE)별 모멘트 이력거동을 나타낸 것이며 Table 9는 각 케이스(CASE)별 최대모멘트와 CASE1을 기준으로 최대모멘트 비율을 나타낸 것이다.

케이스별 해석결과, 다지점 가진의 경우(CASE1)가 각 지층별로 동일한 가속도 시간이력을 입력하는 경우(CASE2~CASE12) 보다 교량 구조물에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 다지점 가진을 고려하지 않으면 교량의 내진성능을 과대평가하게 된다. 또한, 지표면을 기준으로 깊은 지층의 가속도 시간이력을 동시에 입력하는 경우일수록 상대적으로 응답이 작게 나타나고 있는 것을 확인하였다.

3. 결 론

연약지반이 두껍고 다양한 지층구조를 가진 지반에 위치한 단일형 현장타설말뚝 교량은 지진 시 각 지층마다 다른 지진파형이 전달되는 다지점 가진(Multi-Support Excitation)의 영향을 고려할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 연약지반에 위치한 단일형 현장타설말뚝 교량을 대상으로 다지점 가진 비선형 응답이력해석을 수행하였으며, 이를 통해 다지점 가진이 단일형 현장타설말뚝 교량에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 총 14개의 입력지반운동(EQ1~EQ14)을 생성하여 지반응답해석을 수행하였다. 지반응답해석을 통해 각 지층별 가속도 시간이력과 지반스프링계수를 계산하였다. 교량은 교각 및 말뚝의 비선형성을 고려하기 위하여 파이버요소로 모델화하고 지표면 아래의 말뚝에는 각 지층별 지반스프링 모델을 적용하였다.

연약지반의 비선형 거동특성으로 지표면의 최대지반가속도는 증폭되지 않고 오히려 암반의 입력지반가속도 보다 다소 감소하였다.

다지점 가진 비선형 응답해석결과, 단일형 타설말뚝의 최대모멘트는 지표면 아래 1D~3D 근처에서 발생하였으나, 단면의 초기항복 모멘트를 초과하지 않아 전체적으로 탄성거동을 하는 것으로 나타났다.

또한, 다지점 가진(multi-support excitation)이 단일형

현장타설말뚝으로 시공된 교량 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위해 12개 케이스에 대해 비선형 응답이력해석을 수행하였으며 다지점 가진의 경우(CASE1)가 각 지층별로 동일한 가속도 시간이력을 입력하는 경우(CASE2~CASE12) 보다 교량 구조물에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었다. 따라서, 연약지반에 위치한 단일형 현장타설말뚝 교량은 특정지반의 가속도 시간이력을 동일하게 입력하는 경우 비안전측 결과를 도출할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(19SCIP-B146946-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, S.Y., Jeong, S.S., Kim, J.Y. (2011) Proposal of a New Design Method of the Pile-Bent Structure Considering Plastic Hinge, *J. Korean Geotech. Soc.*, 27(2), pp.91~101.
- FHWA (1987) Drilled Shaft, National Highway Institute.
- Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., Taylor, A.W. (1997) Stress-Strain for Reinforced Concrete in Bridge Piers, *J. Struct. Eng., ASCE*, 123(5), pp.624~633.
- Jeon, K.S. (2000) Analysis of Vertical and Horizontal Resistance behaviour of Cast-in-Situ Concrete Piles in Completely Weathered Granite Gneiss, Ph. D. thesis, Seoul University.
- Jeon, K.S. (2004) Design Criteria for Pile Bent Structure, 68, pp.14~27.
- Kent, D.C., Park, R. (1971) Flexural Members with Confined Concrete, *J. Struct. Div., ASCE*, 97(7), pp.1969~1988.
- Kim, J.Y., Hwang, T.J., Jeong, S.S. (2011) Simplified Analysis of Pile Bent Structures and Minimum Reinforcement Ratio, *J. Korean Geotech. Soc.*, 27(5), pp.33~43.
- Korea Geotechnical Society (2015) Explanation of Structural Foundation Design Code.
- Korea Geotechnical Society (2018) Explanation of Structural Foundation Design Code.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988) Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, *J. Struct. Div., ASCE*, 114(8), pp.1827~1849.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988)

- Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J. Struct. Div., ASCE*, 114(8), pp.1804~1826.
- Menegotto, M., Pinto, P.E.** (1973) Method of Analysis of Cyclically Loaded RC Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic behavior of Elements under Normal Force and Bending, Preliminary Report IABSE, 13.
- Ohsaki, Y., Iwasaki, R.** (1973) On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratio of Soil Deposits, *Soil & Found.*, 13, pp.61~73.
- Saatcioglu, M., Razvi, S.R.** (1992) Strength and Ductility of Confined Concrete, *J. Struct. Div., ASCE*, 118(6), pp.1590~1607.
- Sheikh, S.A., Uzumeri, S.M.** (1980) Strength and Ductility of Tied Concrete Columns, *J. Struct. Div., ASCE*, 106(5), pp.1079~1102.
- Son, H.S., Choi, I.K., Kang, D.O., Yang, J.H.** (2005) Design of Single Column Drilled Pier Foundation in Incheon Bridge Viaduct, *Korean Society of Civil Engineers Conference*, pp.959~962.
- Yea, G.G.** (2008) Horizontal Behaviour Characteristics for Single Drilled Shaft Embedded in Granite Gneiss, *J. Eng. Geol.*, 18(4), pp.493~499.

요 지

연약지반이 두껍고 다양한 지층으로 구성된 지역에 건설되는 단일형 현장타설말뚝 교량은 다양한 지층을 통해서 단일형 말뚝으로 입력되는 지반운동에 대해서 내진안전성을 확보하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 설계지반운동에 부합되는 다수의 인공합성지진을 생성하여 이를 암반의 입력지반으로 하여 지반해석을 수행하여 각 지층에서의 지반가속도이력을 산정하였다. 이 가속도이력을 이용하여 각 지층의 지반을 등가스프링으로 모델화하고, 각 지층에서의 가속도시간이력을 입력지반 운동으로 하는 다지점 가진 지진해석을 수행하였다. 연약층의 비선형거동특성으로 입력지반운동의 세기는 크게 증폭되지 않아서 교량은 탄성영역 내에서 거동하였다. 한편, 특정 지층에서 산정된 가속도이력을 모든 지반스프링에 동시에 입력하면 응답이 감소하였다. 따라서, 다지점가진 해석을 수행하지 않으면 이러한 형식의 교량의 내진성능을 과대평가할 수 있다.

핵심용어 : 단일형 현장타설말뚝 교량, 다지점 가진 지진해석, 등가선형 지반스프링, 파이버 모델