

# 3차원 시간이력해석을 통한 매설가스배관 종방향 지진응답 예측을 위한 경험적 설계법의 적용성 평가

## Estimation of Applicability of Empirical Design Procedure for Predicting Seismic Response of Buried Gas Pipelines through 3D Time-history Analysis

곽 형 주<sup>1</sup> Kwak, Hyungjoo

박 두 희<sup>2</sup> Park, Duhee

이 장 근<sup>3</sup> Lee, Janguen

강 재 모<sup>4</sup> Kang, Jaemo

### Abstract

Longitudinal strain is an important component of seismic design for buried pipelines. A design procedure which determines the wavelength from site natural period and shear wave velocity of the soil layer and closed-form solutions of pipelines under a harmonic motion is typically used in design. However, the applicability of the procedure has not yet been thoroughly investigated. In this paper, displacement-time histories extracted from 1D site response analyses are used in 3D shell-spring model to accurately predict the response of pipelines. The results are closely compared to those from the design procedure. The area of interest is East Siberia. Performing a site response analysis to determine site specific displacement time history is highlighted. The site natural period may be used to predict the predominant period of the acceleration time history, but cannot be used to estimate the predominant period of the displacement time history. If an accurate estimate of the predominant period of the displacement time history is provided, it is demonstrated that the design equation can be successfully used to predict the response of pipelines.

### 요 지

매설가스배관의 내진설계에서 종방향 변형률은 중요한 평가 요소이다. 일반적으로 지진파를 조화파로 단순화하며 이의 파장은 토층의 주기와 전단파 속도의 곱으로 계산하여 매설관의 응답을 계산하는 경험적 설계방법이 널리 사용되지만 이의 정확성이 평가된 사례가 없다. 본 연구에서는 1차원 지반응답해석을 수행하여 매설심도에서의 변위-시간 이력을 추출하였으며, 이를 적용한 시간이력해석을 수행하여 매설관의 응답을 평가하였다. 매설관과 지반의 상호작용은 3차원 쉘-스프링 모델을 사용하여 모사하였다. 시간이력해석으로 계산된 결과는 설계방법과 비교하여 이의 정확성을 평가하였다. 비교 결과, 파장을 예측하기 위해서는 지반응답해석을 수행해야 하는 것으로 나타났다. 토층의 고유주기는 가속도의 탁월주기를 예측하는 데에는 활용될 수 있으나 변위의 탁월주기를 예측할 수 없는 것으로 나타났다. 반면, 파장에 대한 정확한 정보가 제공될 경우, 조화파에 대하여 제시된 해석하는 정확도가 높으며 설계에 적용 가능한

1 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-1945, [dpark@hanyang.ac.kr](mailto:dpark@hanyang.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

4 정회원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Member, Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

것으로 나타났다. 본 연구 대상이 동시베리아 지역에 적용될 매설가스관이라 동시베리아 지역의 대표 주상도를 해석에 사용하였지만 본 연구의 결론은 기타 모든 지역에 적용 가능하며 가스관뿐만 아니라 상수도관 등 다양한 매설관에 적용 가능하다.

**Keywords** : Axial strain, Bending strain, Buried pipeline, Wavelength, 3D shell-spring model

## 1. 서론

가스, 석유, 생활용수 등의 이송에 사용되는 매설관은 실생활에 직접적으로 연관되어 있어 손상 시 큰 피해를 유발한다. 1906년 규모 8.3의 San Francisco 지진에 의해 약 50%의 수도관이 파괴되었다. 1985년에는 멕시코 시티에서 규모 8.1의 지진으로 인해 해당지역의 인구 1800만명 중 30%에 대한 수도공급이 중단되었다(ALA, 2001b). Alaska에 설치된 총 1,287km에 이르는 대형 송유관로인 Trans-Alaska Pipeline System(TAPS)은 여러 활성 단층대를 관통하기에 엄격한 내진설계가 적용되었지만, 설계 수준을 초과하는 2002년 규모 7.9의 Denali 지진에 의해 송유관에 상당한 피해가 발생하였다(Honegger et al., 2004). 국내에서는 현재 시베리아를 관통하는 2,000km급 극한지 자원이송망 개발이 추진되고 있다. 송유관은 지상에 고상식 형태로 설치되기도 하지만 가스관은 지중에 매설된다. 국내에는 자원이송망 내진설계에 관한 연구가 제한적이며, 특히 동토지역에서의 내진설계 또는 해석 사례는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 동시베리아 지역에 설치될 매설가스배관의 지진 안정성 평가 방법을 평가하였다.

축방향 길이가 길며 유연도비가 큰 매설가스배관의 경우, 터널과는 다르게 전단변형에 의한 손상이 발생할 확률이 작은 반면 축방향 변형에 의해서 큰 피해가 발생하는 것으로 보고되었다(Tromans, 2004). 즉, 매설가스배관의 내진성능 평가에서 축변형률이 주요 설계 인자이며 이를 정확하게 예측해야 한다. 설계에는 ALA(2005)에 제시된 매설관의 허용변형률이 일반적으로 사용된다.

매설가스배관의 축방향 변형은 관로의 축방향으로 발생하는 변위와 휨변형으로 인하여 발생한다. St. John and Zahrah(1987)은 탄성인 빔(beam)과 지반조건에 대해서 수평평면에서 1방향으로 입사하는 조화파에 대한 해석해를 제시하였다. 하지만 St. John and Zahrah(1987)의 식은 조화파에 대해서만 적용 가능하며 수평평면에서 1방향으로 입사하는 경우에만 사용될 수 있다(Hashash

et al., 2001). 2방향으로 입사하는 실제 지진기록에 대한 매설가스배관의 응답을 사실적으로 예측하기 위해서는 3차원 수치해석을 수행해야 한다. Kwak et al.(2015)은 사실적인 3차원 쉘-스프링 모델을 적용하여 지진파의 입사방향, 입사각, 2방향 재하 등의 영향을 평가하였다. 해석 결과, 지진파의 입사방향과 2방향 재하의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 위에 대한 영향은 고려하지 않았으며 수평평면으로 입사하는 1방향 지진파에 대한 응답만을 계산하였다. Kwak et al.(2015)에서 보고된 바와 같이 3차원 쉘-스프링 모델을 적용한 해석을 통하여 매설관의 지진응답을 정확하게 평가할 수 있다. 하지만 총 연장이 매우 긴 매설관의 설계에서 이를 모든 구간에 적용하는 것은 현실적으로 가능하지 않다. 실제 설계에서는 경험적으로 추정된 파장(wavelength)과 조화파에 대한 해석해(St. John and Zahrah, 1987)를 적용하여 매설관의 지진 응답을 계산한다. 지진파의 파장은 토층의 주기와 지진파 가속도 시간이력의 탁월주파수(predominant frequency)를 통하여 예측하는데, 이와 같은 방법의 정확성이 검증되지 않았다(Hashash et al., 2001).

본 연구에서는 위에서 설명한 매설관의 내진설계 과정의 정확성을 평가하였다. 일차적으로, 일련의 지반응답해석을 수행하여 수치적으로 파장을 계산하였으며 결과를 경험적인 방법과 비교하여 이의 적절성을 평가하였다. 이차적으로는, 3차원 시간이력해석과 조화파에 대한 해석해(St. John and Zahrah, 1987)의 해석 결과를 비교하여 해석해의 정확성을 평가하였다. 본 연구는 시베리아 동토에 설치될 계획이 있는 매설가스배관의 지진 성능을 평가할 수 있는 실용적인 틀을 개발하기 위하여 수행되었다. 따라서 해석에 동시베리아 지역의 대표 주상도가 적용되었다.

## 2. 이론적 배경

St. John and Zahrah(1987)는 수평면(X-Y 평면)에서

입사하는 조화운동에 대한 지중구조물의 응답을 계산하는 해석해(analytical solution)를 두 가지 조건에 대해서 제시하였다(Fig. 1). 지반-구조물의 상호작용을 고려하지 않으며 자유장 지반변형이 구조물과 동일하다고 가정하여 계산된 해석해는 식 (1)~(3)에 정리하였다. 식 (1)~(3)은 각각 S파, P파 그리고 Rayleigh파에 의해 발생하는 총변형률( $\varepsilon^{ab}$ )을 나타낸다. 총변형률은 축변형률과 휨변형률의 합을 나타낸다.

$$\varepsilon^{ab} = \frac{V_S}{C_S} \sin \phi \cos \phi + r \frac{a_S}{C_S^2} \cos^3 \phi \quad (1)$$

$$\varepsilon^{ab} = \frac{V_P}{C_P} \cos^2 \phi + r \frac{a_P}{C_P^2} \sin \phi \cos^2 \phi \quad (2)$$

$$\varepsilon^{ab} = \frac{V_R}{C_R} \cos^2 \phi + r \frac{a_R}{C_R^2} \sin \phi \cos^2 \phi \quad (3)$$

여기서  $V_S, V_P, V_R$ 는 각각 S파, P파 그리고 Rayleigh파의 최대 입자 속도,  $a_S, a_P, a_R$ 은 최대 입자 가속도,  $C_S, C_P, C_R$ 는 전파속도,  $r$ 은 구조물의 반지름을 나타낸다.

St. John and Zahrah(1987)은 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석해도 제시하였다. 지중구조물은 탄성 빔으로 모사하였으며, 제안된 축변형률과 휨변형률에 대한 식은 다음과 같다.

$$\varepsilon^a = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right) A \sin \phi \cos \phi}{2 + \frac{E_I A_c}{K_a} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^2 \phi} \cos\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \phi}\right) \quad (4)$$

$$\varepsilon^b = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2}{1 + \frac{E_I I_c}{K_t} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 \cos^4 \phi} r A \sin\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \phi}\right) \quad (5)$$

여기서  $\varepsilon^a, \varepsilon^b, \varepsilon^{ab}$ 는 각각 축변형률, 휨변형률, 총변형률을 나타내며  $L$ 은 조화운동의 파장,  $A$ 는 조화운동의 변위 진폭,  $E$ 는 지중구조물의 탄성계수,  $I_c$ 는 지중구조물 단면의 넓이,  $I_c$ 는 지하구조물의 관성 모멘트,  $r$ 은 지중구조물의 두께 중앙부로부터 중심까지의 거리,  $K_a$ 는 축 방향 지반 스프링 계수,  $K_t$ 는 횡 방향 지반 스프링 계수,  $x$ 는 지중구조물의 종방향 거리를 나타낸다. 축 변형률은 입사각이  $45^\circ$ , 휨 변형률은  $0^\circ$  일 때 최대가 된다. 일반적으로 매설가스배관의 변형률은 아래와 같이 축변형률 및 휨변형률 최대값을 각각 산정한 후 이를 더해 보수적으로 산정한다.  $\varepsilon_{\max}^a, \varepsilon_{\max}^b$ 는 각각 최대 축변형률과 최대 휨변형률을 나타낸다.

$$\varepsilon^{ab} = \varepsilon_{\max}^a + \varepsilon_{\max}^b = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right) A}{2 + \frac{E_I A_c}{K_a} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} + \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 A}{1 + \frac{E_I I_c}{K_t} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} r \quad (6)$$

식 (4)~(6)을 사용하기 위해서는  $L$ 과  $A$ 의 산정이 필요하다. 하지만 부지 고유의 파장의 예측에는 큰 불확실성이 수반된다. Hashash et al.(2001)은 파장을 토층의 고유주기(site natural period)  $T_s$ 와 전단파 속도  $V_{s-wave}$ 를 곱하여 계산할 것을 제안하였다. 이는 토층 고유주기에서의 증폭이 가장 크기에 지반운동의 탁월주기(predominant period)가 토층의 주기와 일치할 것이라고 가정하였기

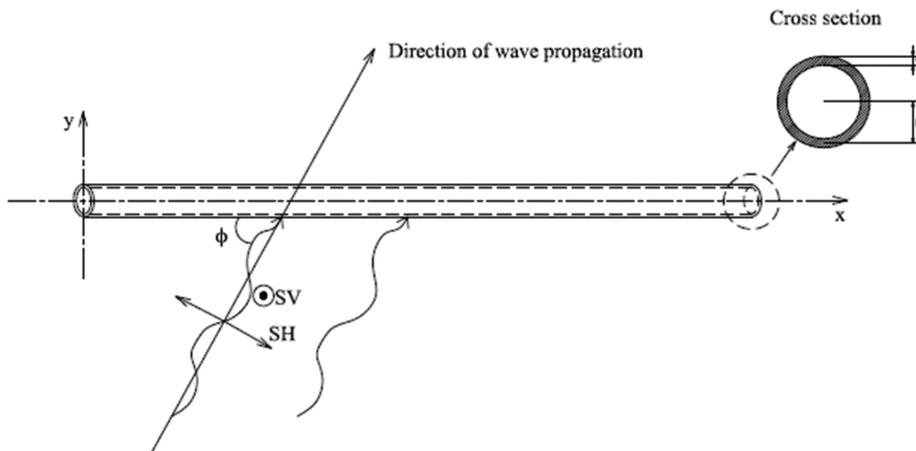


Fig. 1. Seismic wave and pipeline

때문이다. 이와 같은 가정의 적절성은 평가되지 않았다. 나아가 변위의 진폭은 아래와 같이 계산하였다.

$$\frac{2\pi A}{L} = \frac{V_s}{C_s} \sin \phi \cos \phi \quad (7)$$

$$\frac{4\pi^2 A}{L^2} = \frac{a_s}{C_s} \cos^3 \phi \quad (8)$$

위의 식에서 지반운동은 조화운동으로 가정하였다. 위의 식들을 사용할 경우, 최대 입자 속도 또는 최대 입자 가속도에 대한 정보가 필요하다. Hashash et al.(2001)은 이를 가정하여 사용하였으며 실제 지진기록에 대한 적용성은 평가되지 않았다.

### 3. 매설가스배관 종방향 지진응답해석

본 연구에서는 구축된 3차원 셸-스프링 모델을 사용하여 매설가스배관의 3차원 지진응답해석을 수행하였다. 해석에 적용될 지반운동은 1차원 지반응답해석을

통하여 추출된 매설가스배관 심도에서의 변위-시간이력이다. 변위-시간이력과 지반응답해석에서 사용한 전단파 주상도를 적용하여 종방향 변위 주상도를 계산하였으며 파장길이  $L$ 과 변위 진폭  $A$ 를 결정하였다. 최종적으로 수치해석 결과와 해석해를 비교하여, 이의 적용 가능성을 검토하였다. 사용된 해석 모델과 지반응답해석에 대한 세부 사항은 아래에 정리하였다.

#### 3.1 수치해석 모델

지반과 매설가스배관은 각각 탄소성 스프링과 속이빈 원형강 단면을 가진 셸로 모사하여 3차원 해석을 수행하였다. 프레임해석 프로그램인 Zeus NL(Elnashai et al., 2011)을 사용하였으며 정적 시간이력해석(static time history analysis)을 수행하였다. 정적 시간이력해석이란 절점에 변위 시간이력을 재하하는 해석법으로 매 시간 단계마다 절점별로 변위를 재하하여 정적으로 응답을 계산한다. 이 방법은 정적 해석법이지만 시간에 따른 변위의 변화를 모사할 수 있다. 즉, 동적 해석법과는 다르게 운동방정식을 수치적분 하지 않으며 해석 시 속도

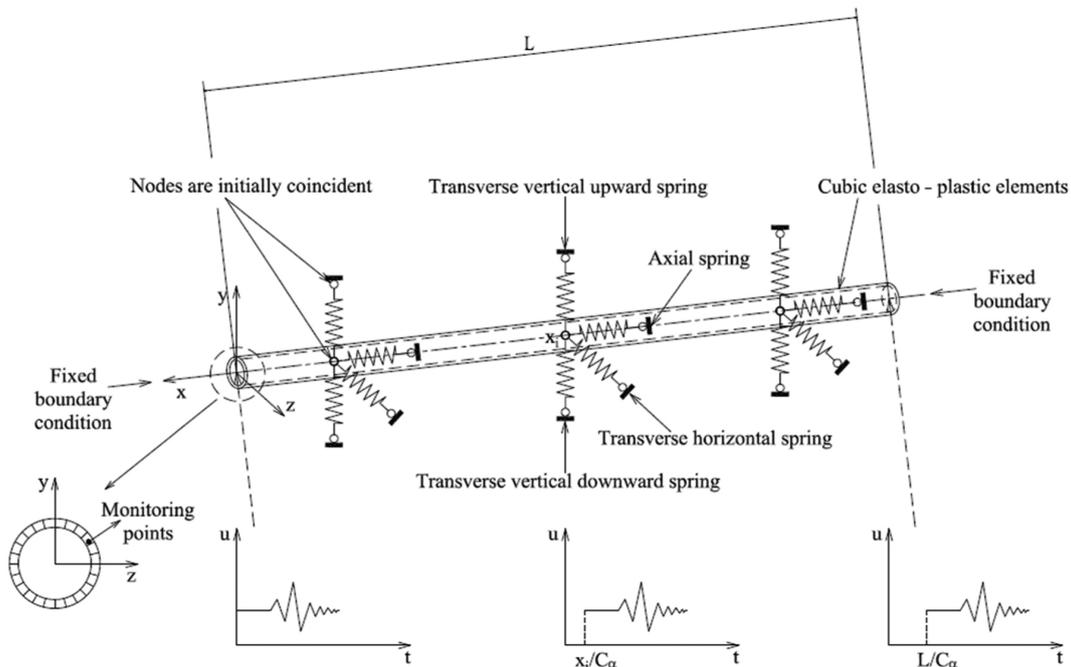


Fig. 2. Numerical model

Table 1. Material properties

Pipe type	Diameter (m)	Thickness (mm)	Buried depth (m)	Elastic modulus E (GPa)	Yield strength (MPa)	Poisson ratio (ν)
Steel API-5L X80	1.219	20	1.5	200	625	0.3

그리고 가속도가 발생되지 않는다. 정적 시간이력해석은 기반으로 둘러 쌓여있어 자유 진동하지 않는 지중구조물의 해석에 적합한 해석방법이다. 해석에 적용된 수치모델은 Fig. 2에 도시하였다. 국내외에서 널리 사용되는 API-5L x80(API, 2000) 매설가스배관의 물성을 적용하였다(Table 1). 매설가스배관은 빔 요소를 사용하지 않고 좀 더 정밀한 해석을 위해 3차원 비탄성 Cubic 요소를 적용하여 속이 비어 있는 원형강 단면을 가진 셸(shell)로 모사하였다. 이 요소는 두 개의 Gauss 단면에서 수치적분을 통해 단면의 깊이에 따라 부재의 비탄성 정도를 평가할 수 있다(Elnashai et al., 2011). 해석 시 매설가스배관의 내압은 무시하였다. Cha et al.(2014)은 매설가스배관의 지진응답해석을 위해, 파이프 요소의 길이와 지반 스프링 간격을 10m로 적용하였다. 본 연구에서는 동일하게 스프링 간격을 10m로 적용하였으며 매설가스배관은 10m 길이를 가지는 Cubic 요소를 300개를 적용하여 총 연장길이 3km인 매설가스배관을 모사하였다. 매설가스배관의 심도는 1.5m를 적용하였다(Table 2). 토탄과 동결 실트는 점성토로 가정하여 해석을 수행하였으

며, 이들의 비배수 전단강도는 Wu et al.(2010)의 해석 결과를 적용하였다. 매설가스배관을 둘러싸고 있는 지반의 거동을 모사하기 위하여 3차원 Joint(Spring) 요소를 적용하였으며 스프링 계수는 ALA(2001a)에서 제시된 탄소성 변위-하중 곡선을 따르도록 모델링하였다. 축방향 및 횡방향 스프링은 대칭 탄소성 변위-하중곡선을 사용한 반면, 연직 방향 스프링은 비대칭 탄소성 변위-하중곡선을 사용하였다(Fig. 3).  $T_u$ ,  $Q_u$ ,  $Q_d$ ,  $P_u$ 는 지반의 각각 축 방향, 연직상향 방향, 연직 하향 방향, 그리고 수평 방향의 단위길이당 최대 저항력을 나타내며,  $x_u$ ,  $y_u$ ,  $y_d$ ,  $z_u$ 는 각각 축 방향, 연직상향 방향, 연직 하향 방향, 그리고 수평 방향의 항복변위를 나타낸다. 계산된 스프링 계수는 Table 3에 정리하였다. 지반 스프링은 반복하중에 대해서 항복 이전까지는 탄성거동을 하며 항복 이후에는 이력 감쇠(hysteretic damping)가 발생하게 된다.

매설가스배관과 같이 종방향으로 긴 구조물의 경우, 각 지점마다 지진 하중이 도달하는 시간차가 발생한다. 도달 시간차는 지진 하중의 크기, 파장길이, 위상 변화를 유발한다(Anastasopoulos et al., 2007). 이를 모사하기 위해, Eurocode8(2002)에서 제시한 방법을 적용하였다.

Table 2. Soil properties

Soil type	Specific weight (kN/m <sup>3</sup> )	Undrained shear strength $S_u$ (kPa)	Average shear wave velocity (m/s)
Peat	19	150	80
Frozen silt	19	600	1000

$$t_i = x_i / C_\alpha \quad (9)$$

$$C_\alpha = V_{s-wave} / \sin \beta_s \quad (10)$$

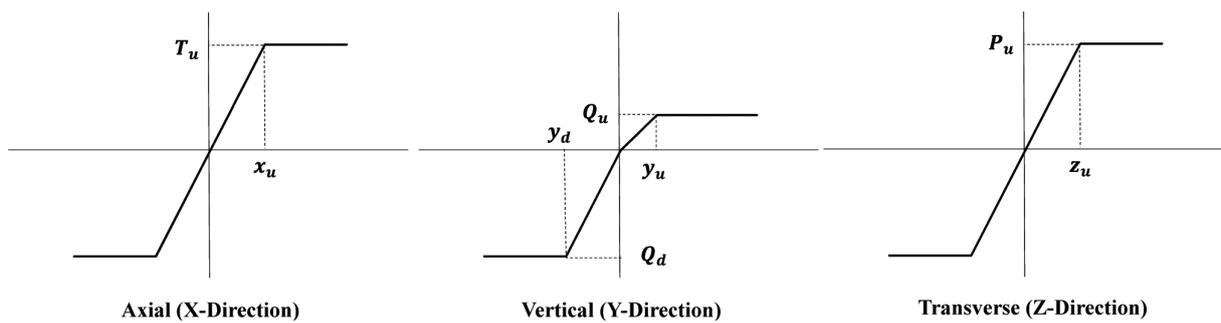


Fig. 3. Force-displacement relationships of soil springs based on ALA (2001)

Table 3. Soil spring coefficients (ALA, 2001)

Soil type	Axial direction		Transverse-horizantal direction		Transverse-vertical direction			
	Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)	Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)	Upward		Downward	
					Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)	Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)
Peat	31.8	9.0	9.2	114.4	2.0	316.4	4.1	243.8
Frozen silt	57.4	8.0	48.9	85.8	12.0	210.9	15.6	243.8

여기서  $t_i$ 는 매설가스배관 종방향으로 각 지점마다의 도달시간을 나타낸다.  $x_i$ 는 매설가스배관 종방향 거리를 나타내며,  $C_\alpha$ 는 매설가스배관의 종방향으로 전파되는 속도,  $\beta_s$ 는 지진 하중이 매설가스배관으로 입사하는 각도를 나타낸다.  $V_{s-wave}$ 는 지표면에서의 전단파 속도로써 매설가스배관의 종방향으로 전파될 경우( $\beta_s = 90^\circ$ ),  $C_\alpha$ 는  $V_{s-wave}$ 와 같아진다(식 (10)). 이에 따라, 매설가스배관에 각 지점마다 지진 하중이 도달하는 시간차를 모사하여 해석을 수행하였다.

### 3.2 종방향 변위주상도 산정을 위한 지반응답해석

본 연구에서는 지진파 주파수 특성의 영향을 살펴보기 위하여 다양한 단층 운동 그리고 규모의 계측 지진기록 5쌍을 선정하여 해석에 적용하였다. KBC(2009)에서는 시간이력해석을 수행함에 있어서 지반운동기록을 최소한 3개 이상 사용하도록 제시하였다. Table 4에 해석에 적용된 계측 기록의 모멘트 지진 규모, 단층 종류 그리고 상부 토층 30m의 평균 전단파 속도( $V_{s30}$ )를 정리하였다. 선정된 계측 지진기록의 최대지반가속도를 KBC(2009)의 설계지반운동 최대가속도인 0.154g로 스케일링하였으며, 이에 대한 응답스펙트럼은 Fig. 5에 도시하였다. 동시베리아의 지진환경에 대한 정보가 없어서 국내 설계지반운동을 적용하였다. 입력지진의 최대지반가속도는 지반의 비선형적 거동과 진폭에 큰 영향을 미치게 된다. 하지만 본 연구에서 중점적으로 분석하고자 하는 파장 그리고 매설관에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단되어 다양한 크기의 가속도를 해석에 적용하지 않았다.

해석을 수행한 부지는 동시베리아 지역에 위치한 Central Yakutia 지역의 Yakutsk이며, 전 지역이 영구 동토지역으로 분류된다. 영구 동토층의 심도는 100~900m이며, 지표면에 외기온도에 따라 융해와 동결을 반복하는 약 0~4m의 계절 동토층이 존재한다. 이 지역은 대부분 실

트질로 구성되어 있으며, 지표면에는 토탄이 넓게 분포되어 있다. 또한 계절 동토층 하부에는 외기온도에 영향을 받지 않는 영구 동토층이 존재한다(Sazonova et al., 2004). 해석에는 Park et al.(2014)이 제시한 Yakutsk의 지반 주상도를 적용하였다(Fig. 4). 상부 토층의 융해심도에 따라 지반 주상도를 각각 0, 2, 4m의 계절 동토층을 적용하였다. 해석에 동시베리아 지역의 주상도를 적용하였지만 본 논문의 결론은 시베리아 동토 지역에 특화된 것이 아니며 국내를 비롯한 모든 지역에 적용 가능함을 밝혀둔다.

상부 토층이 외기온도의 영향으로 융해되었을 경우의 전단파 속도인 80m/s를 적용하였으며, 동결되었을 경우 하부 영구 동토층과 동일하게 1000m/s를 적용하였다. 또한 계절 동토층과 영구 동토층 사이에 급격한 강성의 변화가 일어나지 않을 것으로 예상되어 사이에 Transition층을 적용하였으며 이의 전단파 속도로는 600m/s를 적용하였다. 융해된 지반에는 Boulanger et al.(1998)이 제시한 토탄의 동적 곡선을 적용하였으며 동결된 토

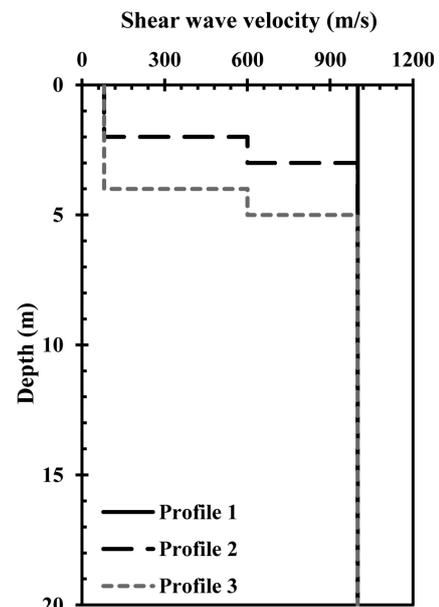


Fig. 4. Representative shear wave velocity profiles of Eastern Siberia

Table 4. Recorded motions

Earthquake	Station name	Magnitude	Fault mechanism	Vs30 (m/s)
Chi-Chi	HWA002	7.6	Reverse oblique	789.2
Coyote lake	Gilroy array #1	5.7	Strike slip	1428.1
Loma prieta	Piedmont Jr High School	6.9	Reverse oblique	895.4
Morgan hill	Gilroy array #1	6.2	Strike slip	1428.1
Umbria-03 Italy	Gubbio	5.6	Normal	922.0

층에는 동결 실트에 대해서 제시된 Qi et al.(2006)의 곡선을 적용하였다. 기반암의 심도는 20m, 전단파 속도와 감쇠비는 각각 1500m/s, 1%를 적용하였다. 지반응답해석에는 Deepsoil(Hashash et al., 2011)을 사용하였으며 1차원 등가선형해석을 수행하였다. 매설가스배관의 예상 매설 깊이인 1.5m에서의 가속도-시간이력을 계산하였으며, 적분을 통해 변위-시간이력을 도출하였다.

Fig. 6~8에는 지반응답해석으로 계산된 각 주상도에 대한 가속도-시간이력과 변위-시간이력을 도시하였다. 계절 동토층의 용해 심도가 깊어질수록, 부지에서의 응답은 증가하는 것으로 나타났다. 계절 동토층의 용해 심도가 0m일 경우 최대지반가속도는 입력지진파와 유사하지만, 용해 심도가 4m일 경우 지진파에 따라 최대 약

4배까지 증가하였다. 변위-시간이력도 계절 동토층의 용해 심도가 깊어질수록 최대변위가 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 9~11에는 지반응답해석을 통해 계산된 변위-시간이력에서 최대 변위가 발생한 지점을 포함한 종방향 변위 주상도를 도시하였다. 이때 지반운동은 수평평면에서 매설가스배관 축 방향과 각도 45°의 방향으로 입사한다고 가정하였다. 계산된 종방향 변위 주상도로부터 최대 변위 발생 시의 파장을 계산하였다. 일정 각도로 입사하는 지진파는 매설관의 종방향으로 도달하는 시간차가 발생하며 그에 따른 지진하중의 위상이 변하게 된다. 매설관에 각도  $\phi$ 로 입사하는 지진 하중의 종방향 및 횡방향 변위이력은  $1/\cos\phi$  배만큼 파장길이가 증

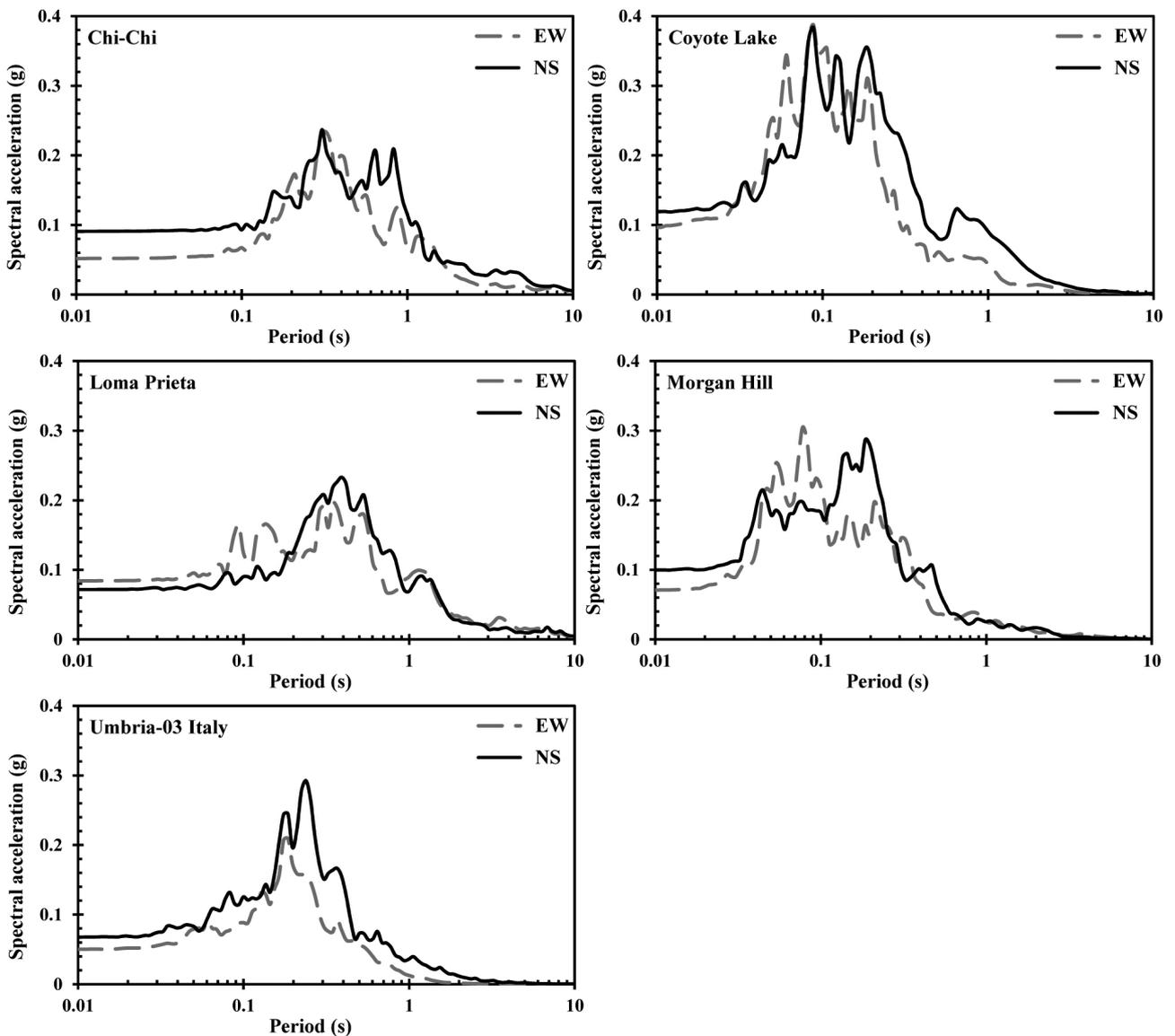


Fig. 5. 5% damped acceleration response spectra of recorded motions

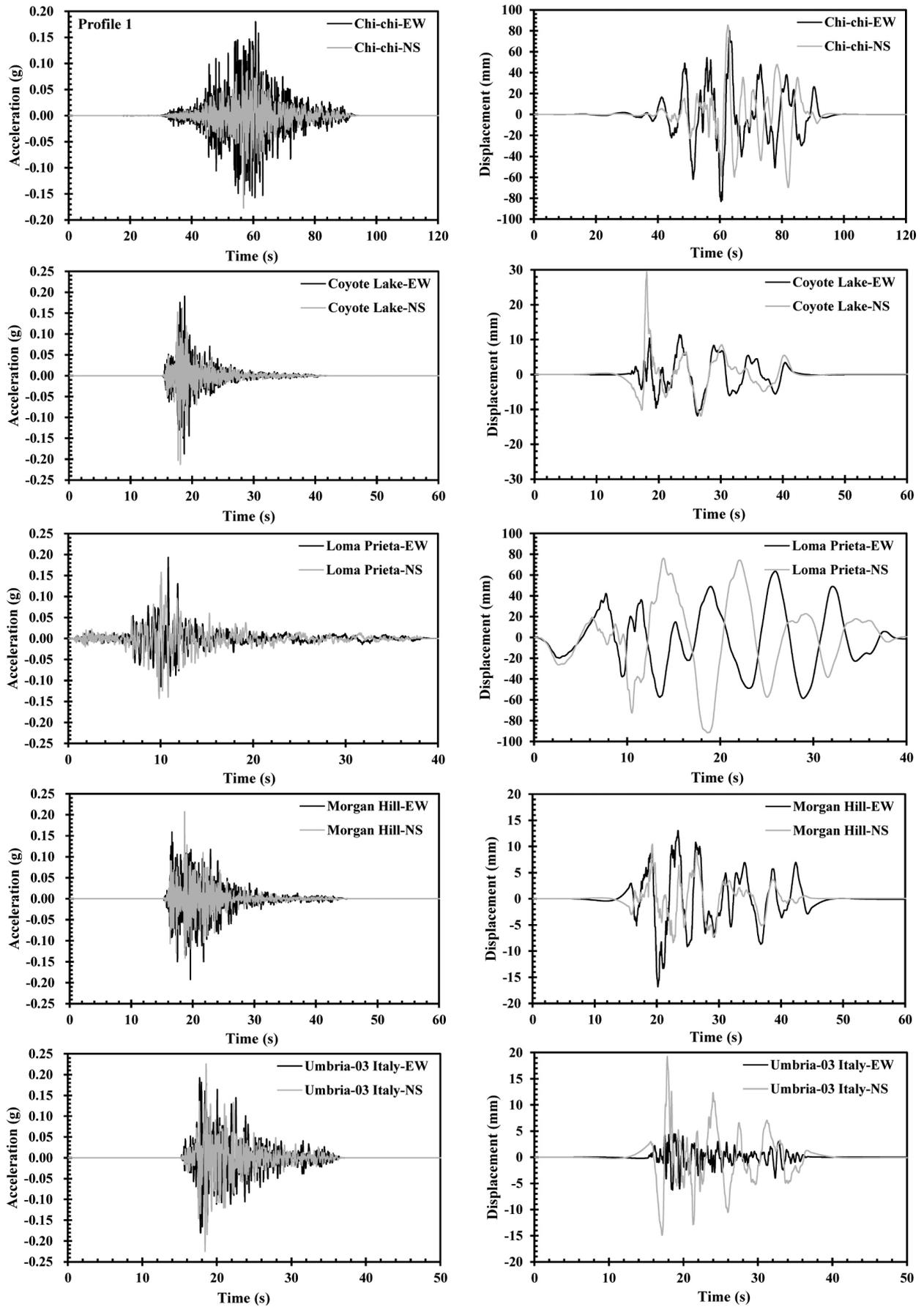


Fig. 6. 1D site response analysis results for Profile 1

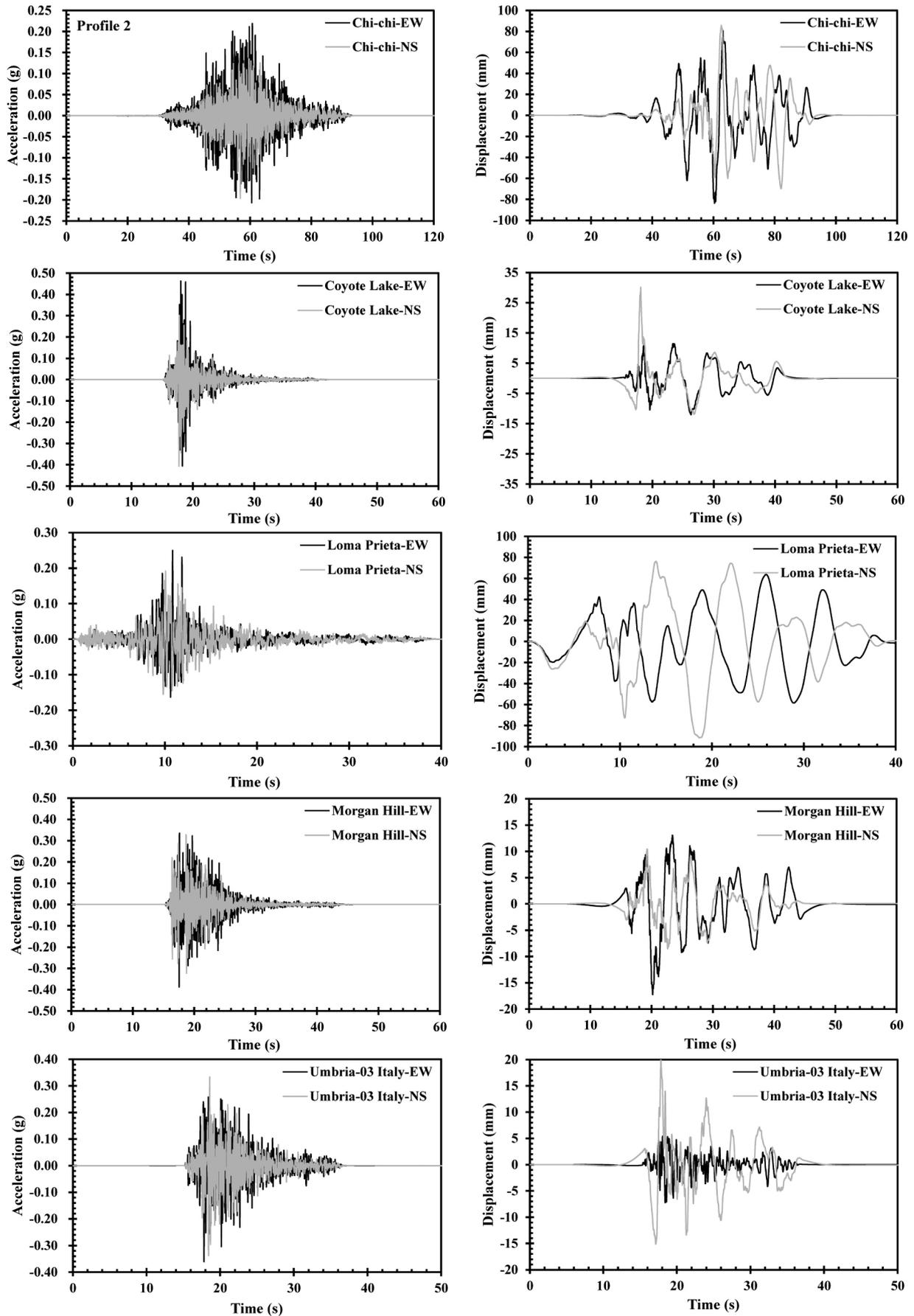


Fig. 7. 1D site response analysis results for Profile 2

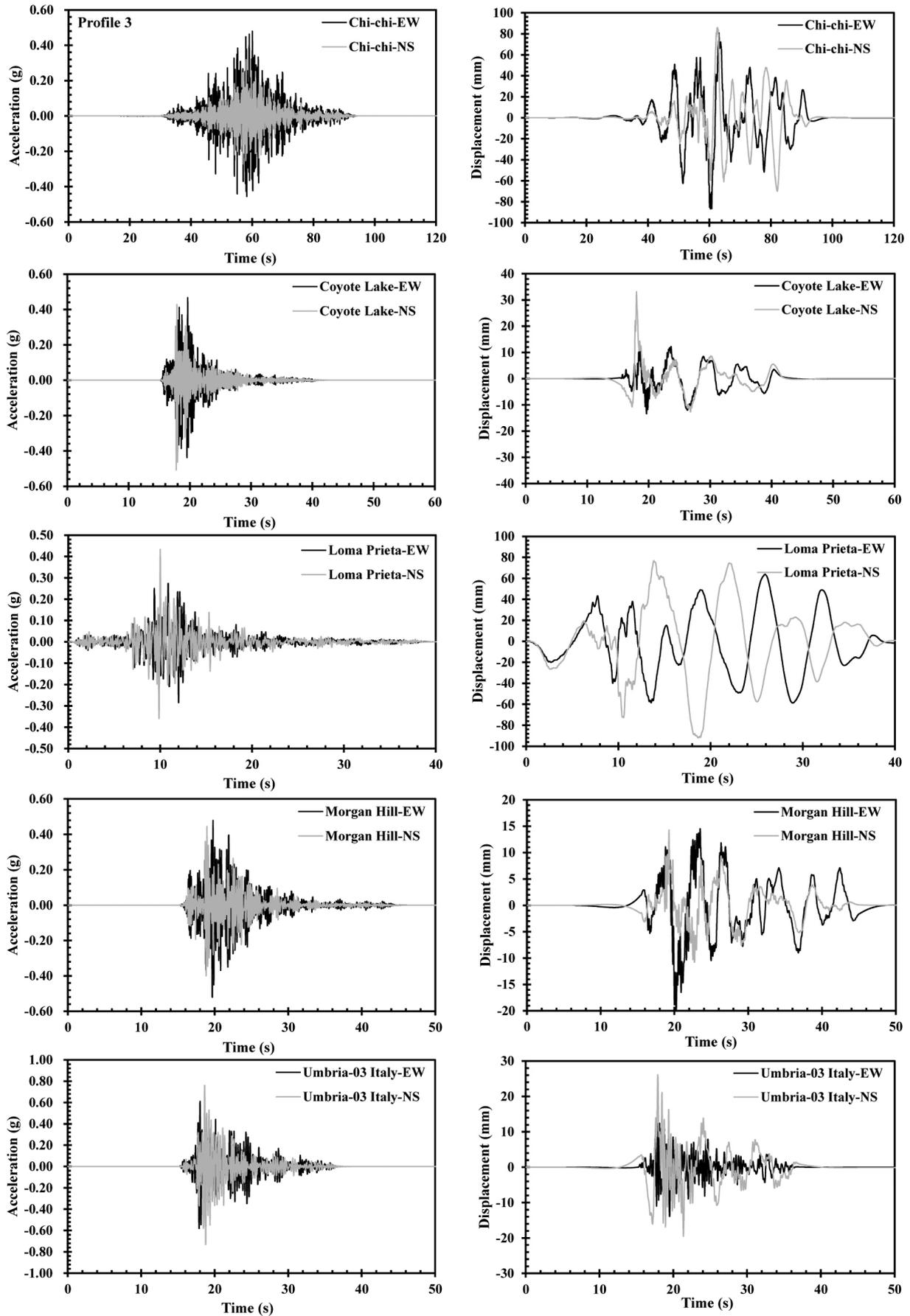


Fig. 8. 1D site response analysis results for Profile 3

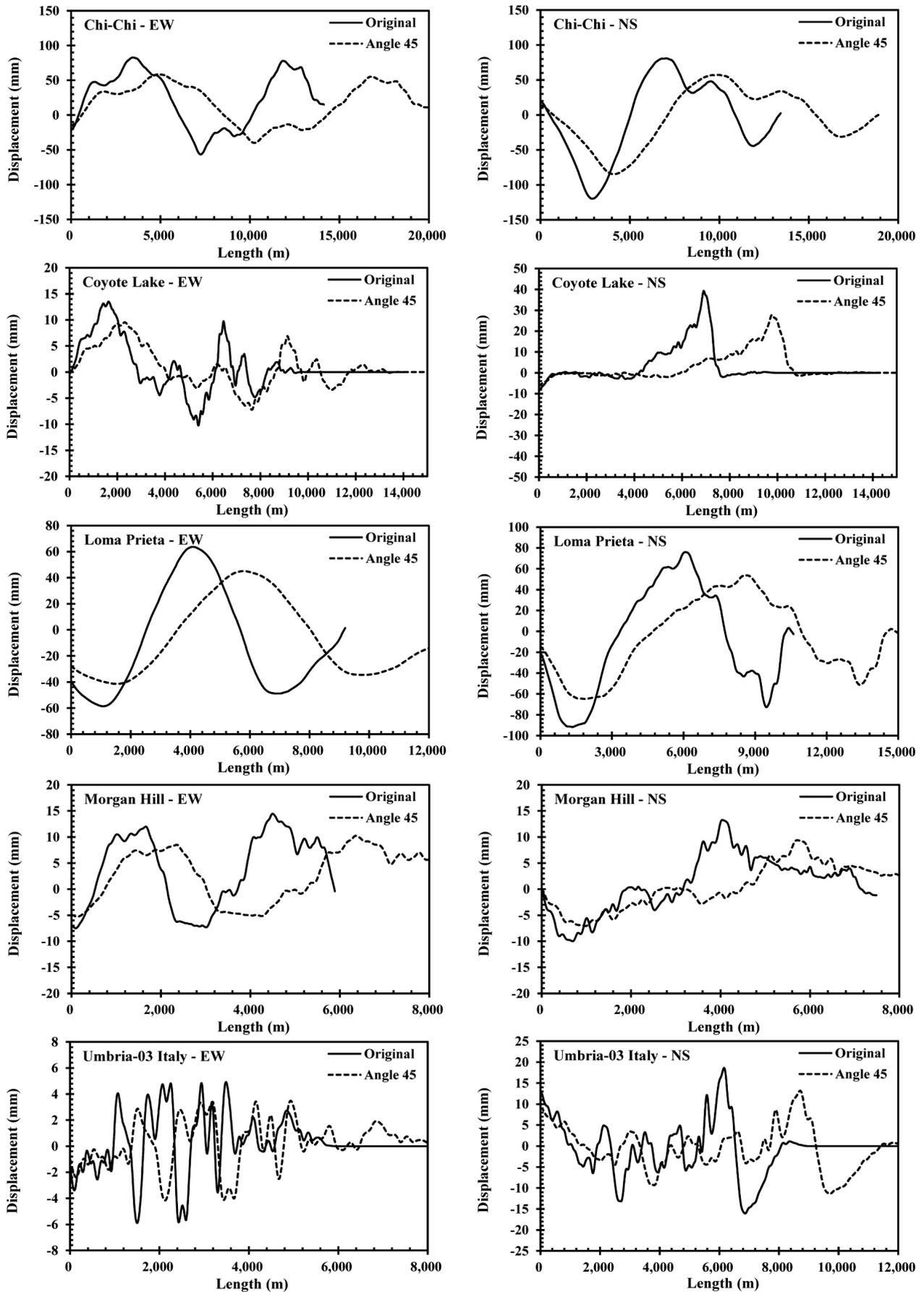


Fig. 9. Longitudinal displacement profile (Profile 1)

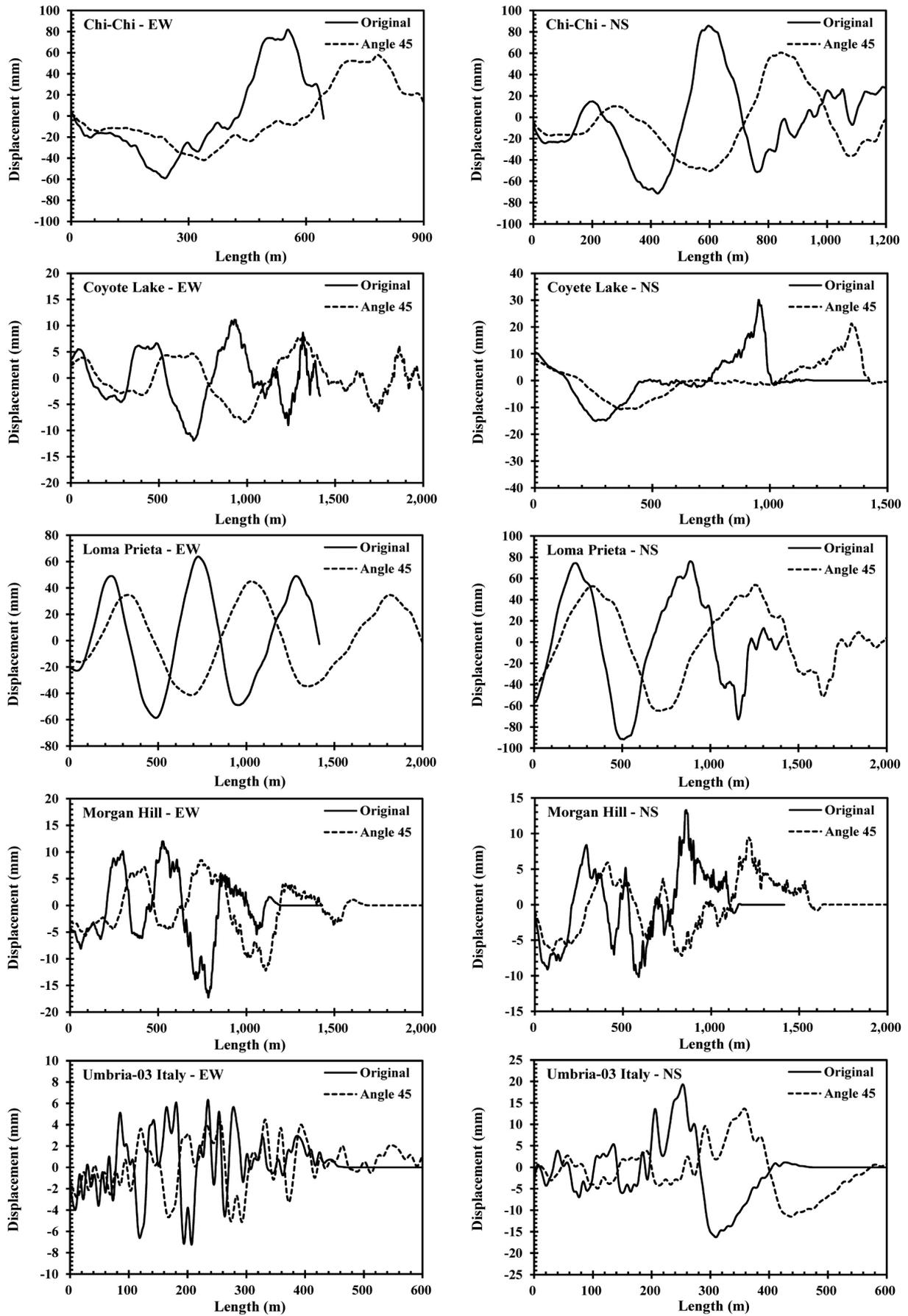


Fig. 10. Longitudinal displacement profile (Profile 2)

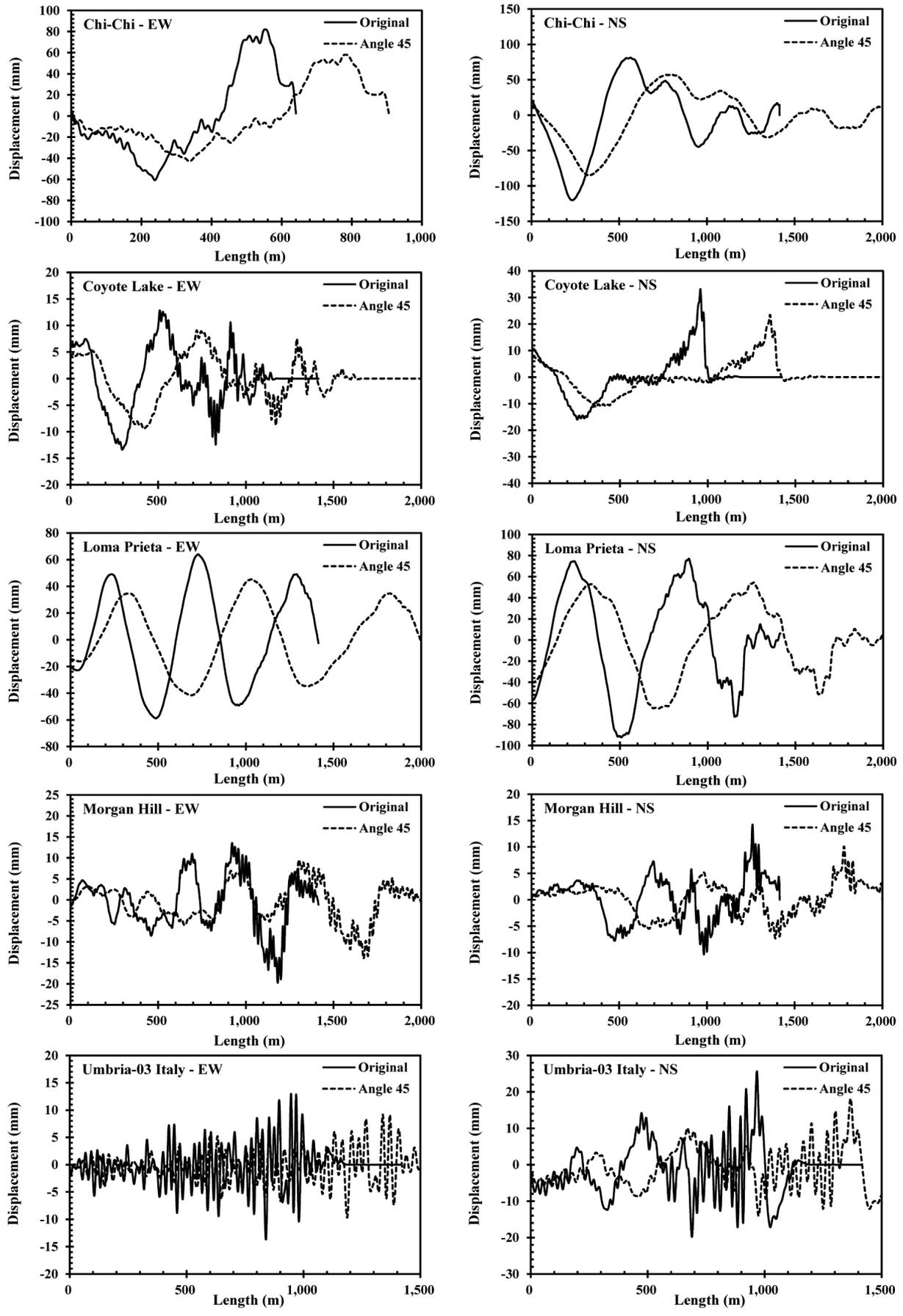


Fig. 11. Longitudinal displacement profile (Profile 3)

가하며 종방향 및 수평방향의 진폭은 각각  $\sin\phi$ 와  $\cos\phi$ 만큼 감소한다(St. John and Zahrah, 1987). 지반응답해석을 통해 계산된 변위-시간이력에 비해 매설관 종방향 및 횡방향 변위는 파장길이가  $1/\cos 45^\circ$ 만큼 증가하였으며, 변위의 크기는 각각  $\sin 45^\circ$ 배와  $\cos 45^\circ$ 배만큼 감소한 것을 확인할 수 있다. 비교 결과, 동일한 최대가속도의 지진기록과 동일한 주상도를 사용하였음에도 불구하고 계산된 파장은 크게 다른 것을 확인할 수 있다. 즉, 파장은 입력지진기록의 파장에 큰 영향을 받으므로 매설가스배관의 설계에는 다양한 탁월주파수의 기록들이 사용되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.3 수치채석 결과와 해석해의 비교

앞에서 설명한 바와 같이, 해석해로 매설가스배관의 종방향 응답을 예측하기 위해서는 파장, 진폭을 추정해야 하며 이를 적용하고 조화운동에 대해서 제시된 식을 이용해서 변형률을 계산해야 한다. 즉 설계법은 식 (4)~(6)만을 의미하는 것이 아니라 파장, 진폭을 예측하는 과정까지 포함된다. 이 연구에서는 먼저 Hashash et al. (2001)이 제시한 파장을 예측하는 경험적 과정을 평가하였다. 이후에는 이를 적용한 해석해의 정확성을 평가하였다. 이 논문에서 진폭을 예측하는 식 (7)과 (8)의 정확성은 평가하지 않았다. 위의 식들은 최대 입자 속도 또는 입자 가속도에 대한 경험식이 있을 경우에만 사용 가능하나 특정 지역(미국 서부)을 제외하고는 이와 같

은 정보가 없기 때문이다. 본 연구에서 변위 진폭은 지반응답해석 결과를 이용하였다.

일차적으로 경험적 파장 예측 방법의 정확성을 평가하였다. 지반응답해석을 통해 계산된 자유장 가속도-시간이력의 탁월주기  $T_p$ , 토층의 고유주기  $T_s$ 를 해석으로 계산된 주기  $T_{calculated}$ 와 비교하였다(Fig. 12).  $T_{calculated}$ 은 지반응답해석을 통해 계산된 변위-시간 이력에서 최대 변위가 발생한 펄스(pulse)의 주기를 나타낸다. 계산된 주기  $T_{calculated}$ 는 토층의 고유주기  $T_s$ 와 탁월주기  $T_p$ 에 비해 현저히 큰 것으로 나타났다. 파장  $L$ 은 주기와 전단파 속도의 곱으로 계산된다. 즉, 경험식으로 계산된 파장은 극히 보수적인 것으로 분석되었다. 위는 조화운동에 대해서 제시된 기존의 방법은 계측지진의 특성을 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 조화운동의 경우, 가속도, 속도, 변위의 진동 주기가 변화하지 않는다. 하지만 계측지진기록의 경우, 가속도를 두 번 적분하면서 고주파수가 필터링(filtering)되면서 전반적으로 주기가 길어진다. 위의 결과는 동시베리아 지역의 주상도에 대한 결과이지만 이는 부지 고유의 결과는 아니라고 판단된다. 오히려 이는 가속도의 탁월주기와 변위의 그것과는 큰 차이가 있다는 것을 나타낸다. 추후 추가적인 지반응답해석을 통해서 이에 대한 검증이 필요할 것이다.

이차적으로는 해석해 (4)~(6)의 정확성을 평가하였다. 조화운동에 대한 해석해를 적용한 결과와 SH파의 형태로 1방향 재하한 수치해석 결과를 각각 Fig. 13(a)에 비교하였다. 해석해 사용 시, 파장은 지반응답해석에

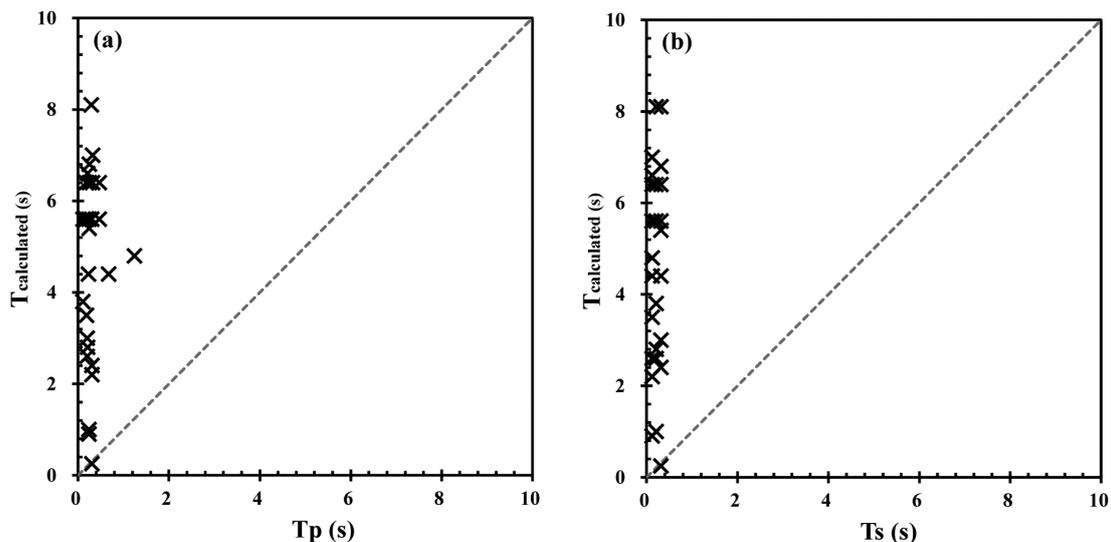


Fig. 12. Comparison between calculated period from site response analysis and (a) Acceleration predominant period ( $T_p$ ), (b) Site natural period ( $T_s$ )

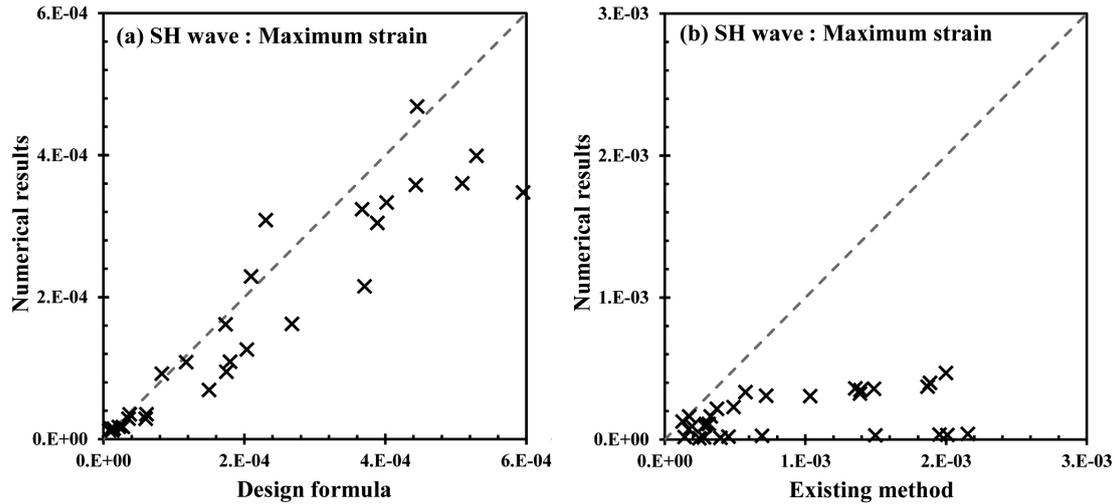


Fig. 13. Comparison between calculated strains from time history analyses with those from design procedure: (a) uses wavelength determined from site response analysis and (b) uses wavelength determined from site natural period

서 계산된 변위-시간이력과 지층의 전단파 속도와 입사 각도를 적용해서 계산하였다. 해석해로 계산된 결과는 수치해석 결과와 유사하거나 다소 큰 것으로 나타났다. 하지만 이 정도의 오차는 설계에는 중요하지 않을 것으로 판단된다. 즉, 실제 조화운동을 하지 않은 지진기록에 대한 응답을 예측할 경우에도, 지반응답해석으로부터 파장만 정확하게 예측하면 3차원 시간이력해석과 유사한 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 단, 해석해와 수치해석간의 차이는 최대지반가속도가 증가하면 동반해서 커질 수도 있다. 이에 대한 분석은 추후 연구에서 규명할 필요가 있다. Fig. 13(b)에는 경험적 방법으로 계산한 파장을 적용하여 예측한 변형률과 3차원 시간이력해석으로부터 계산한 결과를 비교하였다. 경험적으로 추정된 파장은 수치해석으로부터 계산한 그것에 비하여 매우 작기 때문에 계산된 응답도 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 즉, 파장을 정확하게 예측하지 않을 경우, 변형률을 크게 과대 예측하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다양한 지진 하중을 적용한 3차원 시간이력 해석결과와 매설가스배관의 축변형률과 휨변형률을 예측하는 간편화된 해석해를 비교하여 이의 적용성을 평가하였다. 평가 대상 지반은 동시베리아 지역으로 국한하였다. 1차원 지반응답해석으로부터 계산된 변위-시간이력을 추출하여 3차원 해석에 적용하였다. 본 연구에서 도출된 해석 결론은 다음과 같다.

- (1) 외기온도에 따라 상부 토층이 동결과 용해를 반복하는 지역의 주상도를 적용하여 지반응답해석을 수행하였다. 이를 통해 예상 매설 깊이 1.5m에서의 변위-시간 이력을 계산하였다. 입력한 지진 하중은 다양한 주파수 특성, 단층 그리고 규모를 갖는  $S_B$  지반에서 계측된 지진기록 5쌍을 선정하였으며 최대 지반가속도를 0.154g로 스케일링하였다. 3차원 해석에 적용된 변위-시간이력은 가속도-시간이력을 적분함으로써 계산하였다. 해석결과, 상부 토층의 용해심도가 깊어질수록 응답이 증가하는 것으로 확인되었다.
- (2) 기존 연구에서 파장은 토층의 고유주기와 전단파 속도를 곱하여 경험적으로 추정되었다. 하지만 이는 실제 파장을 크게 과소 예측하여 이를 적용할 경우, 응답이 매우 보수적으로 계산되는 것으로 나타났다. 지반응답해석 결과, 변위-시간이력의 탁월주기는 가속도-시간이력의 그것에 비하여 크게 길어진다. 따라서 이를 예측할 수 없는 기존의 경험적 방법은 매설가스배관의 설계에 사용될 수 없을 것으로 판단된다. 따라서, 매설가스배관의 파장을 예측하기 위해서는 지반응답해석으로부터 변위-시간이력을 계산하여 적용해야 할 것으로 판단된다. 본 연구는 동시베리아 지역의 주상도에 대해서 수행되었지만 이는 이 부지에 특화된 결과는 아니라고 판단된다. 오히려 이는 가속도의 탁월주기와 변위의 그것과는 큰 차이가 있다는 것을 나타낸다.

(3) St. John and Zahrah(1987)은 탄성거동을 하는 지반과 지중 구조물의 상호작용을 고려한 축방향 및 횡변형률 해석해를 제시하였다. 3차원 시간이력해석으로 계산된 결과와 해석해를 비교한 결과, 지반 응답해석으로 계산된 변위-시간이력, 지층 전단파 속도, 입사각도를 고려하여 파장을 예측할 경우, 해석하는 매우 정확하게 매설가스배관의 응답을 예측하는 것으로 분석되었다. 단, 해석해와 수치해석 결과는 최대지반가속도가 증가할 경우 차이가 동반해서 커질 수도 있을 것으로 판단된다. 해석해의 적용 범위는 추후 연구에서 규명되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(131FIP-B06700801)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌 (References)

1. ALA (2001a), *Guidelines for the design of buried steel pipe*.
2. ALA (2001b), "Seismic Fragility Formulations for Water Systems", sponsored by the American Lifelines Alliance, G&E Engineering Systems Inc., web site.< <http://homepage.mac.com/eidinger>.
3. ALA (2005), *Seismic Guidelines for Water Pipelines*.
4. Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Drosos, V., Kourkoulis, R., Georgarakos, T., and Gazetas, G. (2007), "Nonlinear Response of Deep Immersed Tunnel to Strong Seismic Shaking", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.9, pp.1067-1090.
5. API (2000), "Specification for Line Pipe", *API specification 5L*, Vol.42.
6. Boulanger, R.W., Arulnathan, R., Jr, L., F. H., Torres, R.A., and Driller, M.W. (1998), "Dynamic Properties of Sherman Island Peat", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No.1, pp.12-20.
7. Cha, K.H., Lee, J.H., Jeong, M.C., and Kong, J.S. (2014), "Seismic Fragility Analysis of Buried Pipeline Considering Soil Dharacteristic", *The 40th Korean Society of Civil Engineers*, pp.477-478.
8. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V.K., and Lee, D.H. (2011), "Zeus

- NL-A System for Inelastic Analysis of Structures".
9. Eurocode8 (2002), "Design of Structures for Earthquake Resistance", *European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 8, Brussels*.
10. Hashash, Y., Hook, J.J., and Schmidt, B. (2001), "Seismic Design and Analysis of Underground Structures", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.16, No.4, pp.247-293.
11. Hashash, Y.M.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D., and Musgrove, M. (2011), "DEEPSOIL 5.0, user Manual and Tutorial", *University of Illinois, Urbana, IL, USA*.
12. Honegger, D.G., Nyman, D.J., Johnson, E.R., Cluff, L.S., and Sorensen, S.P. (2004), "Trans-Alaska Pipeline System Performance in the 2002 Denali Fault, Alaska, Earthquake", *Earthquake spectra*, Vol.20, No.3, pp.707-738.
13. KBC (2009), "Architectural Institute of Korea", *KBC-2009, Architectural Institute of Korea*.
14. Kwak, H.J., Park, D.H., Lee, J.G., and Kang, J.M. (2015), "Effect of Incident Direction of Earthquake Motion on Seismic Response of Buried Pipeline", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol.16, No.9, pp.43-51.
15. Lee, D.H., Kim, B.H., Lee, H., and Kong, J.S. (2009), "Seismic behavior of a Buried Gas Pipeline under Earthquake Excitations", *Engineering Structures*, Vol.31, No.5, pp.1011-1023.
16. Park, D., Kwak, H.J., Kang, J.M., and Lee, Y.G. (2014), "Seismic Amplification Characteristics of Eastern Siberia", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.10, pp.67-80.
17. Qi, J., Ma, W., Sun, C., and Wang, L. (2006), "Ground Motion Analysis in Seasonally Frozen Regions", *Cold regions science and technology*, Vol.44, No.2, pp.111-120.
18. Sazonova, T.S., Romanovsky, V.E., Walsh, J.E., and Sergueev, D.O. (2004), "Permafrost Dynamics in the 20th and 21st Centuries Along the East Siberian Transect", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, Vol.109, No.D1.
19. St. John, C.M. and Zahrah, T.F. (1987), "Aseismic Design of Underground Structures", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.2, No.2, pp.165-197.
20. Tromans, I.J. (2004), *Behaviour of buried water supply pipelines in earthquake zones*, Imperial College London (University of London), pp.1-348.
21. Wu, Y., Sheng, Y., Wang, Y., Jin, H., and Chen, W. (2010), "Stresses and Deformations in a Buried oil Pipeline Subject to Differential Frost Heave in Permafrost Regions", *Cold regions science and technology*, Vol.64, No.3, pp.256-261.

Received : July 22<sup>nd</sup>, 2015

Revised : August 31<sup>st</sup>, 2015

Accepted : September 13<sup>th</sup>, 2015