전력구의 지진응답해석에 사용되는 응답진도법의 보수성 평가

임 재 성¹·김 기 배²·전 낙 현³·김 재 민^{4†}

¹전남대학교 건축토목공학과 박사과정, ²전남대학교 건축토목공학과 석사과정,
³한국전력공사 전력연구원 차세대송변전연구소 구조내진연구실 선임연구원, ⁴전남대학교 토목공학과 교수

Conservativeness Evaluation of Response Acceleration Method used in Seismic Response Analysis of Power Cable Tunnel

Jae-Sung Lim¹, Gi-Bae Kim², Nak-Hyun Chun³ and Jae-Min Kim^{4†}

¹Ph.D. Student, Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea

²M.Sc. Student, Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea

³Senior Researcher, Structural & Seismic Tech. Group, KEPCO Research Institute, Daejeon, 34056, Korea

⁴Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea

Abstract

In this paper, we present the evaluation results for the conservatism of the response acceleration method (RAM), for seismic response analysis of box-type power cable tunnels. We studied 50 examples, considering the cross sections of 25 power cable tunnels, and two soil conditions for each power cable tunnel. A refined dynamic analysis method considering the soil-structure interaction was further employed to evaluate the conservatism of the RAM. The comparison revealed that the seismic responses computed using the RAM were consistent with those obtained using the refined method, since the averages of response ratio (defined as the ratio of the response by RAM to that of the refined method) approached 1.0, and the standard deviations of the response ratio were less than 5%. Finally, we found that applying a load factor of 1.1 to the response of the RAM allowed for a conservative design for seismic loads.

Keywords : power cable tunnel, response acceleration method (RAM), soil-structure interaction (SSI), earthquake resistant design for underground structure

1. 서론

최근 우리나라는 규모 5.0이상의 큰 지진으로 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주지진과 2017년 11월 15일 발생한 규모 5.4의 포항지진이 발생하였다. 특히 포항지진은 역대 가장 많은 재산피해를 발생시켜 지진이 국민의 안전을 실질적으로 위협할 수 있다는 인식을 하게 되었다. 우리나라의 내진설계는 1988년에 건축구조물에 대한 내진설계기준이 처음으로 제정된 이후, 1997년에 내진설계기준 연구를 기반으로 다양한 시설물의 상위기준이 마련되었으며, 이후 다양한 시설물에 대한 시설물별 내진설계기준이 제정되어 왔다. 그 중 지중구조물에 대한 내진설계는 터널설계기준(MOCT, 1999), 도시철도

내진설계기준(MOCT, 2005), 지하공동구내진설계기준(MOCT, 2004) 등이 제개정되어 적용되고 있다.

지중구조물 중 하나인 전력구는 국가 전역에 전기를 공급하는 매우 중요한 국가의 핵심 사회기반시설이다. 이 전력구 시설물은 지진화산재해대책법에 따라 행정안전부에서 고시한 내진설계기준공통적용사항(MOIS, 2017) 및 산업통상자원부의 에너지시설내진공통적용사항(MOTIE, 2018)에 따라 송배전설비에 대한 내진설계 실무지침의 개정이 필요하게 되었다. 이 논문은 송배전설비의 내진설계를 위한 실무지침을 개정하기 위한 배경연구(KEPCO, 2021)의 일부분으로서 전력구 구조물의 지진응답을 산정하기 위한 등가정적해석법인 응답진도법(Response Acceleration Method, RAM)의 보수성에 대한 평가결과이다.

[†]Corresponding author:

Tel: +82-62-530-1651; E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr

Received July 13 2021; Revised August 2 2021;

Accepted August 2 2021

© 2021 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.

현재 국내 내진설계기준에서 전력구에 대한 지진응답해석 방법은 등가정적해석법을 권장한다. 이 등가정적해석법 중 대표적으로 사용되고 있는 방법은 응답변위법과 응답진도법이다. 응답변위법은 구조물의 인접지반을 스프링으로 모델링하고, 구조물에 작용하는 지진하중을 3가지 하중(지반변위하중, 주면전단력하중, 관성력하중)으로 등가 변환하여 구조물의 내진성능을 평가하는 방법이다(Lim *et al.*, 2021). 이 방법은 공동구 및 터널과 같은 지중구조물의 내진해석을 위한 방법으로서 국내 내진설계기준에 광범위하게 사용되고 있다(Kawashima, 2000; Kim *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2010). 그러나 응답변위법은 구조 형태가 박스형상이 아닌 경우에 지반스프링상수 및 지진하중 등을 계산하기 위해 가정된 사항이 복잡하다. 또한, 해석자의 이해 정도에 따라 해석결과의 편차가 클 수 있어서 정밀해석(Ariman and Muleski, 1981; Tsuneo and Kenichi, 2000)을 통한 응답결과와 비교했을 때 종종 지중구조물의 지진응답이 과소평가되기도 한다(Katayama, 1990; Kim and Kim, 2010; Lim *et al.*, 2021).

한편 응답진도법은 지진하중에 의해 발생하는 구조물의 상단과 하단의 상대변위가 최대인 시점에서의 지반가속도를 이용하고, 이를 지반과 구조물을 모두 모델링한 유한요소모델의 질량에 자유장지반에 대해 계산한 높이별 응답진도를 곱한 등가정적하중을 작용하여 지진응답해석을 수행하는 방법이다(Katayama *et al.*, 1985). 응답진도법은 실무자를 위한 실용적이고 일관성이 있는 결과를 제공하며 지중구조물에도 신뢰성 높은 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다(Katayama, 1990; Kim, 2010b).

이 연구에서는 박스형 전력구의 지진응답을 산정하기 위한 응답진도법의 보수성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 50개의 국내 전력구 예제를 선정하고, 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 지진입력에 대하여 응답진도법과 정밀한 동적SSI(Soil-Structure Interaction) 해석법을 적용하여 예제구조물에 대한 설계지진력을 선정하였다. 그리고 응답진도법에 의한 지진력의 정밀해석에 대한 비율인 응답비의 통계적인 분포를 구하였다. 마지막으로 전력구의 보수적인 내진설계에 적용될 수 있는 응답진도법의 하중계수를 응답비의 통계적인 분포에 기반하여 제시하였다.

2. 본 론

2.1 응답진도법 요약

응답진도법은 지중구조물의 내진설계를 위해 고안된 방법으로 지중구조물의 최대응답을 동적 유한요소해석에 의한 최대응답과 근사하게 예측하는 등가정적 지진응답해석법이다(Katayama, 1990; Kim, 2010b). 이 방법에서 가장 큰 가정사항은

‘지중구조물에서 구조물의 가속도 응답이 주변 자유장 지반의 가속도 응답과 매우 유사하다’는 것이다. 이 같은 가정은 실제 지진 시 계측결과로부터 도출되었다(Katayama, 1990).

따라서 응답진도법에서는 구조물과 지반의 강성을 유한요소모델로 적절히 모델링하고, 설계지반가속도에 의한 지반과 지중구조물의 시간 t_{peak} 에서 동적 평형방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}^t(t_{peak})\} + [C]\{\dot{x}^t(t_{peak})\} + [K]\{x^t(t_{peak})\} = \{0\} \quad (1)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ = 각각 지반-구조물계의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬, $\{\ddot{x}^t(t_{peak})\}$, $\{\dot{x}^t(t_{peak})\}$, $\{x^t(t_{peak})\}$ = 각각 시간 t_{peak} 에서 절대가속도벡터, 기반면에 대한 상대속도벡터, 기반면에 대한 상대변위벡터이다. 또한, 식 (1)에서 감쇠력이 관성력 및 탄성복원력에 비해 매우 작다고 가정하여, 감쇠력을 무시하면, 식 (1)은 다음과 같이 근사하여 나타낼 수 있다.

$$[K]\{x^t(t_{peak})\} = \{f_{eqv}\}, \quad \{f_{eqv}\} = -[M]\{\ddot{x}^t(t_{peak})\} \quad (2)$$

여기서, 설계지반가속도($\{\ddot{x}^t(t_{peak})\}$)는 지중구조물-지반의 가속도가 자유장지반의 가속도와 매우 유사하다고 가정하여, 자유장해석(free-field analysis)을 통해 구한 응답을 적용한다. 그리고 t_{peak} 은 지중구조물의 상단과 하단에서 자유장응답 변위의 차이가 가장 큰 시각을 사용한다. 응답진도법의 적용과정을 그림으로 정리하면 Fig. 1과 같다.

2.2 해석예제의 정의

이 절에 기술한 예제 및 입력지진운동은 응답변위법에 대한 보수성을 평가한 연구논문(Lim *et al.*, 2021)의 내용과 동일하다.

Fig. 1 Conceptual diagram of response acceleration method

2.2.1 박스형 전력구 구조물 및 지반조건

응답진도법에 의한 전력구의 지진응답해석을 수행하기 위하여 실제 제작 설치된 박스형 전력구 구조물의 상세와 지반 조사 자료를 참고하였다. 예제해석을 위해 각각 25개의 서로 다른 구조물 단면과 층상지반을 선정하였다. 그리고 각 지반 구조물 단면에 대해 2개의 지반 특성값(전단파속도가 300m/s 이하의 경우 지반조사 보정계수에 의해 0.8 을 곱하여 적용)을 고려하여, 총 50개의 예제를 구성하였다. Fig. 2에 나타난 예제구조물의 폭(B), 높이(H), 벽체의 두께(t_1, t_2, t_w)와 매립된 깊이(z_1) 및 표층지반의 총 깊이(H_s)를 Table 1에 상세히 나타내었다. 또한 전체 해석예제의 설계 초기전단파속도를 Fig. 3에 나타내었다. 이때 최소값은 100m/s 이고 최대값은 560m/s 이며, 기반암의 전단파속도는 760m/s 이상으로 적용하였다. 해석예제의 지반종류는 대부분 모래, 점토, 자갈 및 풍화암으로 이루어져 있으며, 25개의 지반의 특성값을 Fig. 4에 표시하였다.

Fig. 2 Definition of structural model and seismic input(Lim *et al.*, 2021)

Fig. 3 Design initial shear wave velocity V_{si} profiles given in Table 1

Table 1 Definitions of numerical analysis model(unit:m)

Case Label	Structural Dimension ID ($B \times H, t_1, t_2, t_w$)	Soil Layer Depth ID (z_1, H_s)	Soil Property ID	Soil type (MOLIT, 2018)
1	B1 ($2.7 \times 3.325, 0.4, 0.45, 0.4$)	L1 ($10.04, 30.0$)	S1	S_4
2			S2	S_4
3	B2 ($2.6 \times 2.9, 0.3, 0.4, 0.3$)	L2 ($6.0, 15.2$)	S3	S_2
4			S4	S_2
5	B3 ($2.6 \times 3.475, 0.3, 0.35, 0.3$)	L3 ($4.0, 22.5$)	S5	S_4
6			S6	S_4
7	B4 ($2.0 \times 2.525, 0.3, 0.35, 0.3$)	L4 ($2.3, 30.0$)	S7	S_4
8			S8	S_4
9	B5 ($2.7 \times 2.9, 0.3, 0.3, 0.3$)	L5 ($0.93, 27.4$)	S9	S_4
10			S10	S_5
11	B6 ($2.65 \times 2.95, 0.35, 0.45, 0.35$)	L6 ($2.5, 22.0$)	S11	S_4
12			S12	S_4
13	B7 ($2.65 \times 2.95, 0.35, 0.45, 0.35$)	L7 ($8.6, 24.0$)	S13	S_4
14			S14	S_4
15	B8 ($2.4 \times 2.53, 0.3, 0.35, 0.3$)	L8 ($5.53, 20.82$)	S15	S_4
16			S16	S_4
17	B9 ($2.4 \times 2.53, 0.3, 0.35, 0.3$)	L9 ($5.54, 16.54$)	S17	S_2
18			S18	S_2
19	B10 ($2.6 \times 3.18, 0.3, 0.45, 0.3$)	L10 ($4.0, 17.8$)	S19	S_3
20			S20	S_3
21	B11 ($3.0 \times 4.60, 0.6, 0.7, 0.7$)	L11 ($11.0, 30.0$)	S21	S_4
22			S22	S_4
23	B12 ($2.6 \times 2.93, 0.3, 0.4, 0.3$)	L12 ($6.9, 22.0$)	S23	S_4
24			S24	S_4
25	B13 ($2.55 \times 3.38, 0.35, 0.4, 0.35$)	L13 ($2.2, 30.0$)	S25	S_4
26			S26	S_4
27	B14 ($2.35 \times 2.43, 0.25, 0.4, 0.25$)	L14 ($3.98, 11.5$)	S27	S_2
28			S28	S_3
29	B15 ($2.5 \times 2.48, 0.3, 0.35, 0.3$)	L15 ($3.3, 18.0$)	S29	S_2
30			S30	S_3
31	B16 ($2.35 \times 2.425, 0.25, 0.4, 0.25$)	L16 ($3.98, 11.5$)	S31	S_2
32			S32	S_3
33	B17 ($2.4 \times 2.475, 0.3, 0.35, 0.3$)	L17 ($9.2, 48.0$)	S33	S_4
34			S34	S_5
35	B18 ($2.3 \times 2.425, 0.25, 0.4, 0.25$)	L18 ($8.1, 48.0$)	S35	S_4
36			S36	S_4
37	B19 ($3.0 \times 4.6, 0.6, 0.7, 0.7$)	L19 ($9.4, 54.0$)	S37	S_4
38			S38	S_4
39	B20 ($2.55 \times 3.375, 0.35, 0.4, 0.35$)	L20 ($2.2, 30.0$)	S39	S_4
40			S40	S_4
41	B21 ($2.0 \times 2.525, 0.4, 0.45, 0.4$)	L21 ($2.3, 30.0$)	S41	S_4
42			S42	S_4
43	B22 ($2.475 \times 2.5, 0.3, 0.35, 0.3$)	L22 ($8.7, 18.0$)	S43	S_3
44			S44	S_3
45	B23 ($2.475 \times 2.5, 0.3, 0.35, 0.3$)	L23 ($3.3, 18.0$)	S45	S_2
46			S46	S_3
47	B24 ($2.05 \times 2.425, 0.3, 0.35, 0.3$)	L24 ($8.1, 12.0$)	S47	S_3
48			S48	S_3
49	B25 ($2.55 \times 2.575, 0.35, 0.4, 0.35$)	L25 ($4.0, 17.2$)	S49	S_2
50			S50	S_3

Fig. 4 Ground conditions for numerical analysis models

Fig. 5 Design response spectrum depending on seismic performance target levels

Fig. 7 Nonlinear behavior of soils used for free-field analysis (Richards *et al.*, 2012)

Fig. 6 Input control acceleration time histories depending on seismic performance target levels

2.2.2 설계응답스펙트럼 및 입력지진운동

이 연구에서 사용한 입력지진운동은 내진설계일반(MOLIT, 2018)에 주어진 암반의 수평방향 설계가속도응답스펙트럼을 만족하도록 Fig. 5와 같이 작성하였다. 내진목표 성능수준은 기능수행수준(Operational performance level, OLE)과 붕괴방지수준(Collapse prevention performance level, CLE)으로 결정하였고 각 수준의 설계지진 재현주기는 내진특등급에 해당하는 200년과 2400년이며 지진구역은 I구역으로 적용하였다. 이때, 내진성능수준에 해당하는 유효수평지반가속도(S)는 기능수행수준에서 0.0803g이며, 붕괴방지수준에서 0.22g이다. Fig. 6과 같이 작성된 인공지진파를 예제모델의 기반암 노두에 입력하여 지진응답해석을 수행하였다.

2.3 동적 지반-구조물 상호작용해석 및 응답진도법 해석

2.3.1 동적 지반-구조물 상호작용해석

전력구의 지진응답해석법에 사용되는 응답진도법의 보수

Fig. 8 Boundary conditions and output locations of member forces

성을 평가하기 위하여 정밀한 동적해석을 수행하여 응답을 비교하였다. 이를 위해 진동수영역에서 지반-구조물 상호작용해석이 가능한 KIESSI-3D 프로그램(Kim *et al.*, 2012; Seo and Kim, 2012)을 이용하였다. KIESSI-3D 프로그램을 이용한 등가선형 지반응답해석을 수행하기 전에 지반의 비선형 동적변형특성을 고려한 등가선형 자유장해석을 수행하여, 지반의 등가선형 전단계수와 등가선형 감쇠비를 결정하였다. 이때 선정 부지의 지층종류에 대한 비선형곡선은 Fig. 7과 같이 기존 문헌자료에서 제시된 자료를 참고하였다(Richards *et al.*, 2012). 동적해석은 2차원 평면변형문제로 근사하기 위해 Fig. 8과 같은 경계조건을 적용하였고 지반은 3차원 입체요소로 묘사하였으며, 구조물은 3차원 보 요소로 표현하였다. 부재력의 출력 위치는 응력이 집중되어 큰 하중이 걸리는 구조물의 상단과 하단, 외벽의 상단과 하단으로 정하였다. 동적 지진응답해석은 Fig. 9와 같은 총 25개의 구조모델과 두 종류의 지반조건을 조합한 총 50개 예제에 대해 수행되었다. 이 절에 기술한 동적 지반-구조물 상호작용해석은 응답변위법에 대한 보수성을 평가한 동반 연구논문(Lim *et al.*, 2021)의 내용과 동일하다.

Fig. 9 Analysis models for the dynamic SSI analysis

2.3.2 응답진도법

응답진도법 해석은 구조해석용 전산프로그램 SAP2000에 의해 수행되었다. 전력구의 구조해석모델은 Fig. 9와 같은 인접지반을 유한요소 모델로 2차원 평면변형요소로 묘사하였고 구조물은 3차원 보 요소로 작성하였다. 또한, 지반 매질의 비선형성을 고려한 등가선형 자유장해석을 수행하였다. 자유장해석은 M-SHAKE를 이용하여 수행되었다(Kim, 2010a). 이를 통해 구조물 상단과 하단이 위치하는 지반에서 자유장응답의 차이가 가장 큰 시각의 설계지반가속도에 각 층의 지반 질량을 곱하

여 중력하중으로 입력하였다. Fig. 8과 같이 응력집중이 예상되는 네 군데에서 부재력을 출력하였다. 이때 각 지점을 색깔로 구분하여 Fig. 10~Fig. 13과같이 응답비의 분포도에 표시하였다.

2.4 동적 지반-구조물 상호작용해석 및 응답진도법 해석 결과 비교

이상에서 응답진도법과 동적 SSI 해석을 수행하였고, 각각 50개 세트의 관심지점에서 부재력(전단력, 휨모멘트)의 최댓

Fig. 10 Comparison of response ratio(OLE,SF=1.0)

Fig. 11 Comparison of response ratio(OLE,SF=1.1)

값을 도출하였다. 응답진도법과 동적 SSI 해석의 부재력을 서로 비교하기 위해 동적 SSI 응답 대비 응답진도법의 응답비 (Response Ratio, RR)를 산정하고 이의 분포를 Fig. 10부터 Fig. 15에 나타내었다.

$$RR \equiv \frac{RAM}{SSI} \quad (3)$$

여기서, RAM은 응답진도법에 의한 응답이며 SSI는 동적 SSI 해석에 의한 최대응답이다.

그리고 응답비의 통계분포를 살펴보기 위하여 응답비의 확률분포 특성을 대수정규분포(lognormal distribution)로 나타내었다. 이로부터 응답비의 표준편차 σ_{RR} 과 평균 μ_{RR} 을 다음과

Fig. 12 Comparison of response ratio(CLE,SF=1.0)

Fig. 13 Comparison of response ratio(CLE,SF=1.1)

같이 구하였다: $\sigma_{RR} = \exp(\sigma_{\ln RR})$, $\mu_{RR} = \exp(\mu_{\ln RR})$.

기능수행수준에 대한 부재력(전단력, 휨모멘트) 응답비의 분포는 Fig. 10과 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 응답진도법에 의한 최대응답이 동적 SSI 해석 결과와 매우 유사하다. 즉, 응답비의 평균이 1에 근접하고 표준편차가 매우 작다. 응답비가 1보다 작을 확률은 전단력에 대해 37%, 휨모멘트에 대해 27%로 상당히 크게 나타났다. 이는 응답비의 평균이 1에 근접하기 때문이다. 그리고 응답비가 1보다 작을 확률을 줄인 보수적인 설계를 위해서는 응답진도법에 의한 지진력에 하중계수를 곱하여 적용해야 한다. 한 예로서 하중계수로 1.1을 적용하면, Fig. 11에 보인바와 같이 응답비가 1보다 작을 확률이 전단력에 대해 2%, 휨모멘트에 대해 0%로 매우 보수적인 결과를 보였다.

Fig. 14 Comparison of response ratio of RDM and RAM(OLE, SF=1.1)

Fig. 15 Comparison of response ratio of RDM and RAM(CLE, SF=1.1)

Fig. 12에 나타낸 바와 같이 붕괴방지수준에 대한 응답비의 통계적인 분포 특성도 기능수행수준에 대한 분포 특성과 매우 유사하였다. Fig. 13과 같이 붕괴방지수준에 대한 하중계수 1.1을 적용한 결과, 응답비가 1보다 작을 확률은 전단력에 대해 2%, 휨모멘트에 대해 0%로 나타났다.

마지막으로 선행연구의 응답변위법(Lim *et al.*, 2021)으로 구한 응답비와 응답진도법의 응답비를 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해 각각 비교한 결과를 Fig. 14와 Fig. 15에 정리하였다. 응답비 평균의 경우, 응답변위법이 응답진도법보다 약 10% 크다. 하지만, 표준편차의 경우 두 해석법이 약 6배의 차이를 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 응답진도법이 응답변위법에 비해 계산된 응답의 일관성이 뚜렷함을 알 수 있다. 즉, 응답의 기대치가 평균값에 매우 가깝게 나타난다.

3. 결 론

이 연구에서는 박스형 전력구의 지진응답을 산정하기 위한 응답진도법의 보수성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 50개의 전력구 예제를 작성하였으며, 이에 대한 지진응답해석을 응답진도법과 동적 SSI 해석법을 사용하여 수행하였다. 그리고 응답진도법에 의한 지진력의 정밀 해석에 대한 응답비를 구하였고, 통계적 분석을 수행하였다. 다음과 같은 최종 결론에 도달하였다.

- 1) 정밀해석 응답 대비 응답진도법에 의한 응답의 비로 정의한 응답비의 평균이 1.0에 근접하며, 응답비의 표준편

차도 5% 이내로 매우 작았다. 동반 연구논문(Lim *et al.*, 2021)에 제시한 응답변위법에 의한 응답비의 표준편차는 약 24%로서 응답진도법의 표준편차에 비해 약 6배의 큰 값이었다. 이는 응답진도법이 상대적으로 일관된 기대치를 얻을 수 있음을 나타낸다.

- 2) 응답진도법에 의한 설계지진력이 동적 SSI 해석에 의한 설계력 보다 작을 확률은 기능수행수준에서 전단력이 37%, 휨모멘트는 27%이었고, 붕괴방지수준에서는 전단력이 68%, 휨모멘트는 65%로 나타났다. 그리고 보수적인 설계를 위해 응답진도법에 하중계수 1.1을 적용할 경우, 응답진도법의 설계력이 동적 SSI 해석에 의한 설계력 보다 작을 확률은 기능수행수준에서 전단력이 2%, 휨모멘트는 0%이었고, 붕괴방지수준에서도 전단력이 2%, 휨모멘트는 0%로 나타났다. 이 또한 응답진도법이 응답변위법에 비해 지중 전력구 구조물의 보수적 내진설계를 수행할 수 있음을 의미한다.

마지막으로 이 연구에서는 변형률의존 변형특성의 종류가 3가지로 한정되어 있고 입력지진운동이 한 개로 제한되어 있으며 구조물의 단면이 박스형으로만 구성되어 있다. 이로 인한 해석조건의 한계가 존재하므로 지반의 다양한 변형률의존 변형특성, 입력지반운동의 변동성 및 다양한 구조단면 형상에 따른 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국전력공사의 “송배전설비의 내진설계 실무지침서 개정” 연구과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ariman, T., Muleski, G.E. (1981) A Review of The Response of Buried Pipelines Under Seismic Excitations, *J. Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 9(2), pp.133~152.
- Katayama, I. (1990) Studies on Fundamental Problems in Seismic Design Analyses of Critical Structures and Facilities, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Japan.
- Katayama, I., Adachi, M., Shimada, M., Tsuzuki, T., Seshimo, Y. (1985) A Quasi-Static Analysis Method for Buried Structures - A Proposal of Response Acceleration Method, Abstracts, *40th Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers*, Part 1, pp.737~738.
- Kawashima, K. (2000) Seismic Design of Underground Structures in Soft Ground: A Review, In: Fujita and Miyazaki (eds),

- Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam.
- KEPCO (Korea Electric Power Cooperation)** (2021) Seismic Design Code of Transmission and Distribution Facilities (DS-0050), Korea.
- Kim, D.G., Seo, H.Y., Park, J.W., Choe, L.J.** (2006) Earthquake Response Analyses of Underground Structures Using Displacement Responses of Soil, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 10(6), pp.133~142.
- Kim, J.M.** (2010a) Seismic Design of Underground Structures and Directions for Further Improvement, *Proc. Earthq. Eng. Soc. Korea Conf.*, pp.272~311.
- Kim, J.M., Kim, D.A.** (2010) A Study on Conservativeness of Seismic Deformation Method for Earthquake Analysis of Underground Structures, *Proc. Earthq. Eng. Soc. Korea Conf.*, pp.83~86.
- Kim, J.M., Lee, E.H., Chung, K.Y., Seo, C.G.** (2012) An Applicability of KIESSI-3D Program for Soil-Structure Interaction Analysis, *Proc. Civil Eng. Soc. Korea Conf.*, pp.334~337.
- Kim, J.W.** (2010b) Ground Response Seismic Coefficient Method for Earthquake Analysis of Underground Structure, Master Thesis, Chonnam National University, Korea.
- Kim, Y.M., Jeong, S.S., Lee, Y.H., Jang, J.B.** (2010) Seismic Design of Vertical Shaft using Response Displacement Method, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 30(6), pp.241~253.
- Lim, J.S., Yang, D.S., Hwang, K.M., Kim, J.M.** (2021) Conservativeness of Response Displacement Method used in the Seismic Response Analysis of Power Cable Tunnel, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 34(4), pp.243~254.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation)** (1999) Manual on Tunnel Design, Korean Tunnelling Association, Korea.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation)** (2004) Seismic Design Standards for Underground Tunnels, Ministry of Construction and Transportation, Korea.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation)** (2005) Seismic Design Standard for Urban Railway, Ministry of Construction and Transportation, Korea.
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety)** (2017) Seismic Design Criteria Common Application, Ministry of the Interior and Safety, Korea.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport)** (2018) General Seismic Design (KDS 17 10 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy)** (2018) Requests for Detailed Revision of each Facility according to the Establishment of Seismic Design Standards for Power Equipment, Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea.
- Richards, J., Hamel, J., Kassawara, R.** (2012) Seismic Evaluation Guidance, Screening, Prioritization and Implementation Details (SPID) for the Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.1: *Seismic*, EPRI, USA.
- Seo, C.G., Kim, J.M.** (2012) KIESSI Program for 3-D Soil-Structure Interaction Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(3), pp.77~83.
- Tsuneo, O., Kenichi, Y.** (2000) Simplified Analysis Based on Non-Linear Seismic Coefficient Method for Sewage Facilities, *Nippon Koei Technical Forum*, 9, Japan.

요 지

이 논문에서는 박스형 전력구의 지진응답해석에 사용되는 응답진도법의 보수성을 평가하였다. 이를 위해 25가지 전력구 단면과 각 전력구에 대한 2개의 지반조건을 고려한 총 50개 예제를 선정하였다. 응답진도법의 보수성을 평가하기 위해 동적 지반-구조물 상호작용을 고려한 정밀해석법에 의한 응답과 비교하였다. 비교결과, 정밀해석 응답에 대한 응답진도법에 의한 응답의 비로 정의한 응답비의 평균이 1.0에 근접하며, 응답비의 표준편차도 5% 이내로 매우 작아서, 응답진도법에 의한 해석이 정밀해석법과 일관됨을 알 수 있었다. 마지막으로 응답진도법에 의한 응답에 하중계수 1.1을 적용하면 전력구의 보수적인 내진설계가 가능할 것으로 나타났다.

핵심용어 : 전력구, 응답진도법, 지반-구조물 상호작용, 지중구조물내진설계