

Study on Seismic Performance Evaluation and Verification of Seismic Safety for Power Cable Tunnels

개착식 전력구의 내진성능 평가 및 내진 안전성 검증

Kyeong-min Hwang, Nak-hyun Chun, Gil-young Chung, Kyung-sung Park
황경민, 전낙현, 정길영, 박경성

Abstract

In this paper, the seismic performance evaluation was performed on 100 existing open-cut power cable tunnels, including ones that did not consider seismic design, in order to verify that the government's demand level (seismic special grade, 0.22 g). The results of the seismic performance evaluation show that most of the tunnels have seismic performance of 0.3 to 1 g, satisfying the level of the seismic special grade and securing the seismic safety. Meanwhile, the earthquake response analysis and structural test were performed to verify the validity of the method and the results of the seismic performance evaluation of the tunnels by the response displacement method, and to verify their seismic safety. As a result, the relative displacement due to the response displacement method under the 0.22 g earthquake was conservative than the results of the earthquake response analysis, and the results of load-displacement curves and response modification coefficient calculation by real scale structural tests showed the safety of the tunnels.

본 논문에서는 내진설계가 고려되어 있지 않은 전력구를 포함한 기설 개착식 전력구 100개소를 대상으로, 정부의 요구수준(내진 특등급, 0.22 g)을 만족하는지 확인하기 위하여 내진성능 평가를 수행하였다. 내진성능 평가 결과, 대상 전력구들은 대부분 0.3-1 g의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타나, 내진 특등급 수준을 만족하였으며 내진안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 한편 응답변위법에 의한 전력구의 내진성능 평가 방법 및 결과에 대한 타당성을 확인하고, 전력구의 내진 안전성을 검증하기 위한 지진응답 해석 및 구조실험을 수행하였다. 그 결과 0.22 g 수준의 지진 하에서 응답변위법에 의한 상대변위는 지진응답 해석 결과보다 보수적이었으며, 실규모 구조실험에 의한 하중-변위 곡선 및 응답수정계수 산정 결과를 통해 전력구의 내진 안전성을 확인할 수 있었다.

Keywords: Power Cable Tunnel, Seismic Performance Evaluation, Response Displacement Method, Real Scale Test, Response Modification Coefficient

I. Introduction

도시가 대형화 및 고급화되면서 지중 구조물의 건설이 증가되어 왔으며, 이에 따라 송전 및 배전을 담당하는 지중 전력구의 운영기간도 늘어나고 있다. 2019년 6월 기준 약 690 km 구간의 송배전 전력구가 운영 중에 있으나, 60% 이상에 해당하는 424 km 구간의 전력구는 우리 회사의 내진설계기준이 제정된 시점인 2003년 이전에 설계되어 내진설계가 반영되어 있지 않았다. 또한 2003년 이후에 설계된 전력구들의 경우에도 현재 우리 회사의 내진설계 요구수준(내진 I등급, 0.154 g)의 지진하중에는 안전하도록 검토되어 있으나, 경주지진(2016년, 규모 5.8) 이후 산업통상자원

부의 요구수준(내진 특등급, 0.22 g)의 지진하중에 대한 검토는 이루어지지 않은 상황이다.

전력구는 대도시 지역 등에 전력을 공급하는 중요한 기간시설물로서 '지진·화산재해대책법'에서 요구하는 내진안전성 확보대상 구조물이다. 따라서 본 논문에서는 전력구의 일반적인 형태인 박스형 개착식 전력구를 대상으로 내진성능을 평가하여 산업통상자원부의 요구수준을 만족하는지 여부와 보유하고 있는 내진성능을 확인해 보고자 하였다. 그리고 대표적인 전력구를 대상으로 지진응답 해석 및 구조실험을 수행하여 내진성능 평가 결과의 타당성을 확인함으로써 전력구의 내진 안전성을 검증해 보았다.

Article Information

Manuscript Received December 26, 2019, Revised March 16, 2020, Accepted March 25, 2020, Published online December 30, 2020

K. Hwang and N. Chun are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

G. Chung is with Cenits Corporation, Ace High & Tower 9th 233 Gasan Digital 1-Ro Geumcheon-Gu, Seoul 08501, Republic of Korea.

K. Park is with Gwangju Jeonnam Regional Headquarter, Korea Electric Power Corporation, 222 Uchi-Ro Buk-Gu, Gwangju 61130, Republic of Korea.

Correspondence Author: Kyeong-min Hwang (hkm0316@kepc.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepc.co.kr>.

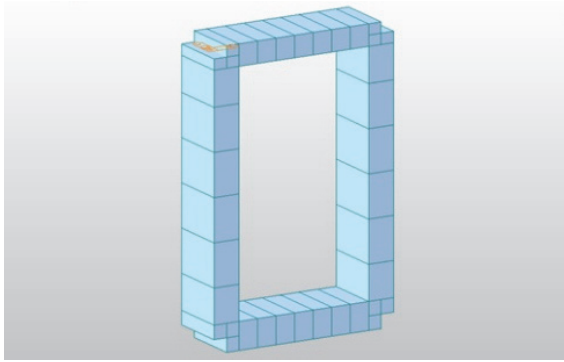
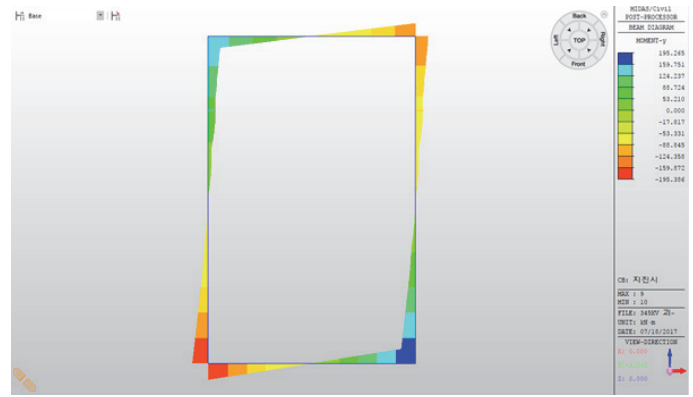
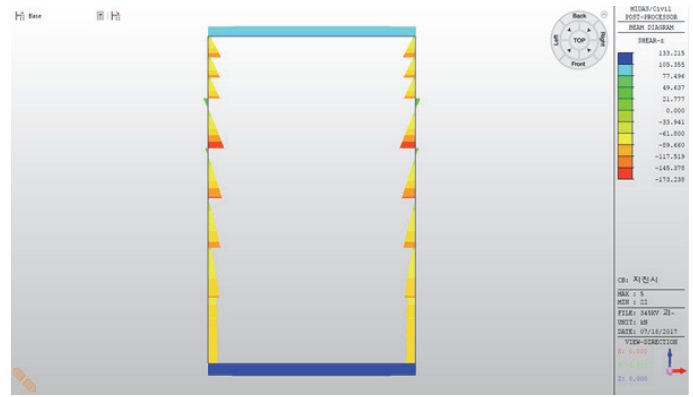


Fig. 1. A numerical analysis model of a representative tunnel.



(a)



(b)

Fig. 2. Numerical analysis result considering an earthquake load. (a) Moment diagram. (b) Shear force diagram.

TABLE 1
Power Cable Tunnels Subject to Seismic Capacity Evaluation

No	Area	Number	No. of Sections	Evaluation Length (km)
1	Busan/Ulsan	37	89	13.9
2	Daegu/Gyeongbuk	20	27	5.5
3	Gyeongnam	1	1	0.03
4	Seoul/Gyeonggi	24	31	12.9
5	Gangwon/Chungcheong	9	12	4.0
6	Jeolla/Jeju	9	9	3.5
	Total	100	169	39.9

TABLE 2
Numerical Analysis Results of Representative Power Cable Tunnels

Tunnel	Area	Capacity (g)	Safety factor	Vulnerable part
A	Busan/Ulsan	0.26	1.26	Bottom of the wall
B	Daegu/Gyeongbuk	0.30	1.72	
C	Busan/Ulsan	0.30	1.41	
D	Seoul/Gyeonggi	0.33	1.14	
E	Busan/Ulsan	0.33	1.09	
F	Busan/Ulsan	0.33	1.47	
G	Daegu/Gyeongbuk	0.34	1.52	
H	Busan/Ulsan	0.34	2.98	Top of the wall Lower slab end
I	Busan/Ulsan	0.35	1.19	
J	Busan/Ulsan	0.35	1.21	
K	Busan/Ulsan	0.35	1.29	
L	Busan/Ulsan	0.37	1.40	

II. 내진성능 평가 방법

A. 평가대상 전력구

내진성능 평가를 위해 TABLE 1과 같이 최근 지진활동이 잦았던 경상도 지역의 57개소 등 전국에서 운영중인 대표 전력구 100개소(345 kV 북부산(괴정삼거리)-남부산 전력구 등)를 선정하였다. 동일한 전력구 내에서도 다양한 제원의 단면이 설계됨에 따라, 단면 수로 평가대상을 나타내면 총 169개이다. 이 중 21개소 32개 단면은 내진 1등급의 지진하중에 대한 안전성이 검토된 2003년 이후에 설계된 전력구이다.

B. 내진성능 평가 방법

전력구와 같은 지중 구조물의 지진응답 특성은 지반 속에서 지반에 순응하여 구조물이 진동하도록 거동하게 된다. 즉 구조물의 관성력이 중요한 지상 구조물과 달리, 지중 구조물은 지진 시 지반에 변위가 생기고 이 변위가 전력구에 하중으로 작용하게 되어 응력을 발생시킨다. 따라서 단일 코사인 이론으로 산정한 지반의 변위를 전력구에 작용하는 지진하중으로 변환시키는 응답변위법으로 내진성능 평가를 수행하였다. 이에 따라 지반변위에 의한 하중, 주변전단력 및 관성력 등을 고려하여 전력구에 발생하는 단면력을 수치해석으로 계산한 후, 전력구가 보유하고 있는 휨 및 전단 내력과 비교하여 내진안전성을 확인하였다. 수치해석은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS CIVIL로 수행하였다.

전력구의 내진성능 평가 시 아래와 같이 붕괴방지수준의 지진하중조합을 사용하였다.

$$U = 1.0(D+L+H+E) \quad (1)$$

여기서 D 는 고정하중, L 은 활하중, H 는 토압 및 수압, E 는 지진하중을 의미한다. 지진하중은 행정안전부의 '내진설계기준 공통적용사항'에서 제시하는 내진 특등급(2,400년 재현주기) 암반지반의 0.22 g 설계응답스펙트럼을 적용하였다. 감쇠 보정계수 CD 는 '송배전설비 내진설계 실무지침(2014)'에 따라 붕괴방지수준으로서

TABLE 3

Representative Power Cable Tunnels for Reviewing Analysis Results

Tunnel	Area	Base rock depth (m)	V_s (m/s) (Soil layer)	Natural Period (sec)
1	Busan/Ulsan	30	289	0.427
2	Daegu/Gyeongbuk	30	258	0.582
3	Busan/Ulsan	33	251	0.737
4	Busan/Ulsan	48	251	0.998
5	Busan/Ulsan	54	227	1.277

TABLE 4

Comparison of Relative Displacements for Power Cable Tunnels

Tunnel	Height (m)	Max. relative displacement (mm)		Notes (F/C)
		Single cosine method [C]	Free field Analysis [F]	
1	4.6	2.046	1.286	62.9%
2	2.425	0.488	0.403	82.6%
3	2.5	1.106	1.038	93.9%
4	2.425	0.789	0.305	38.7%
5	2.5	0.478	0.292	61.1%

20%를 사용하였으며, 응답수정계수는 모멘트에 대해서만 2를 적용하였다.

III. 내진성능 평가 결과

A. 수치해석 모델 및 단면력

Fig. 1 및 Fig. 2는 대표적으로 345 kV 북부산(괴정삼거리)-남부산 전력구에 대한 수치해석 모델 및 모멘트, 전단력 등의 단면력 해석결과를 각각 보여주고 있다.

B. 내진성능 평가 결과

TABLE 1의 전력구 100개소에 대한 내진성능 평가 결과를 내진 안전율과 내진성능 값으로 나타내면 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 여기서 내진 안전율은 0.22 g 수준의 지진하중에 대한 최대 단면력 대비 전력구 내력의 비로서, 1.0을 이상일 때 내진 안전성을 확보함을 의미한다. Fig. 3은 전력구들의 내진해석에 의한 최소 모멘트 안전율 및 최소 전단 안전율을 나타내고 있다. 내진 안전율의 범위는 대부분 1.0-2.0의 값이며, 모든 전력구가 1.0 이상으로서 내진 안전성을 확보하고 있음을 보여주고 있다. 한편 내진성능 값은 전력구의 내력에서 상시하중에 의한 단면력을 뺀 후, 지진하중에 의한 단면력으로 나누어서 산정한 것으로, 평가대상 모든 전력구는 대부분 0.3-1 g의 내진성능을 보유하고 있음을 알 수 있다.

내진성능 값이 낮은 대표적인 전력구의 내진성능 평가 결과를 정리하면 TABLE 2와 같다. 내진성능 값이 가장 낮은 전력구는 부산/울산 지역의 A 전력구로서 0.26 g의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다. A 전력구가 D 전력구보다 안전율이 큰데, 내진성능이 작은 것은 Eq. (1)에서 상시하중(고정 및 활하중) 대비 지진하중의 비중이 상대적으로 더 커서 지진의 크기변화에 민감하기 때문이다. 한편 전력구에서 안전율이 가장 작은 부위는 벽체 하단 및 상단 등 응력이 집중되는 우각부위인 것으로 나타났다.

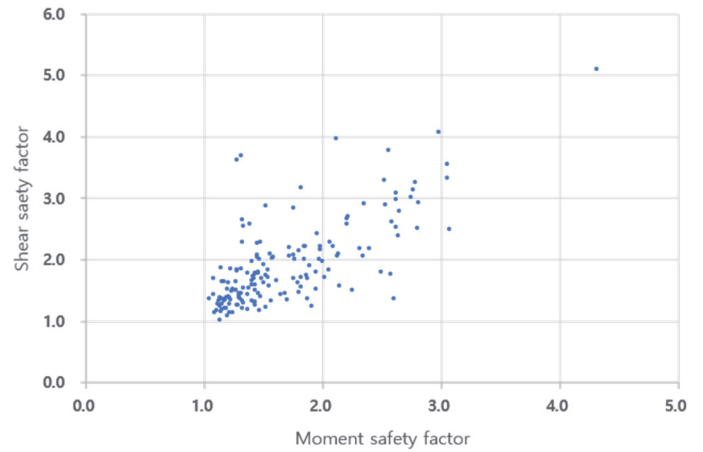


Fig. 3. Safety factor distribution of the power cable tunnels.

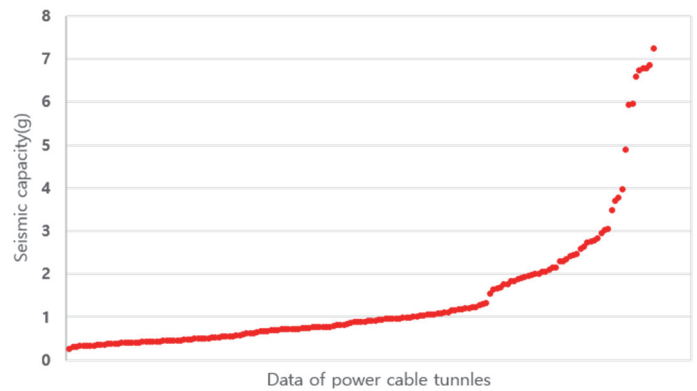


Fig. 4. Seismic capacity distribution of the power cable tunnels.

IV. 내진성능 평가 결과의 분석

A. 응답변위법 적용의 적정성 분석

‘송배전설비 내진설계 실무지침(2014)’에 따르면 전력구의 해석대상 부지가 연약층이 깊게 발달되어 있어 고유주기가 0.4초 이상인 경우 지진응답 해석을 이용하여 기반면의 속도 응답스펙트럼을 구해야 한다고 규정하고 있다. 따라서 TABLE 3과 같이 토층의 고유주기가 0.4초 이상인 대표 전력구를 대상으로 단일 코사인 이론을 통한 응답변위법과 지진응답 해석에 의한 전력구의 최대 상대변위를 비교함으로써 연약지반에서 운영중인 전력구의 내진성능 평가 시에도 응답변위법 적용이 적정한지를 확인하고자 하였다.

지반의 지진응답 해석인 자유장 해석은 MIDAS GTS NX의 Free Field Analysis를 통해 수행하였으며, 그 결과 TABLE 4와 같이 지진응답 해석에 의한 변위가 단일 코사인의 응답변위법에 의한 변위의 38-94% 수준으로 나타났다. 따라서 토층의 고유주기가 0.4초 이상인 연약지반 조건인 경우 단일 코사인 이론 및 응답변위법에 의한 내진성능 평가 방법이 정밀한 자유장해석 방법에 비해 보수적이며 내진성능이 낮게 평가되는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 대표적으로 5번 전력구에 대한 상대변위 결과를 비교해서 보여주고 있다.

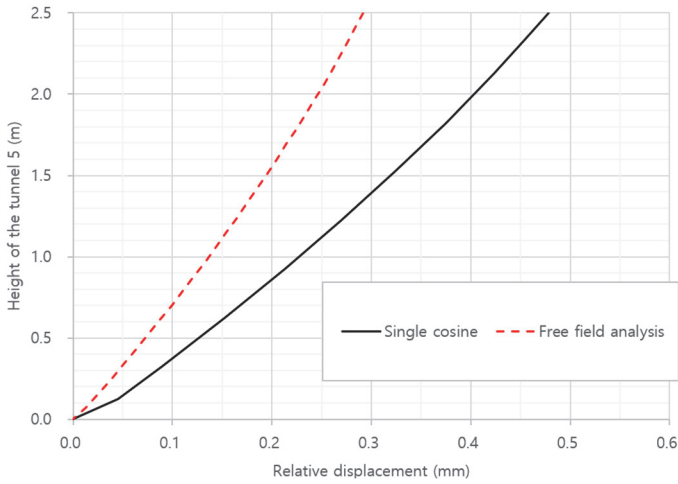


Fig. 5. Comparison of relative displacement by two analysis methods.

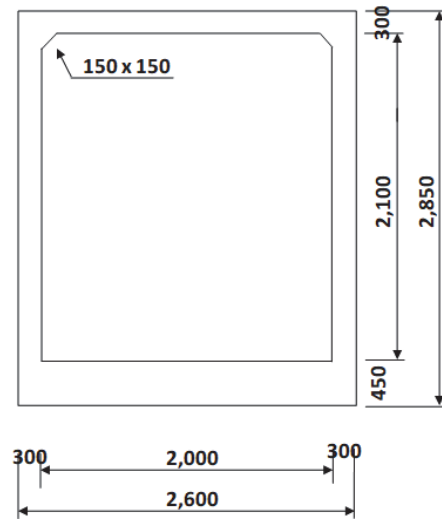


Fig. 7. Sectional dimension of a power cable tunnel specimen 1.

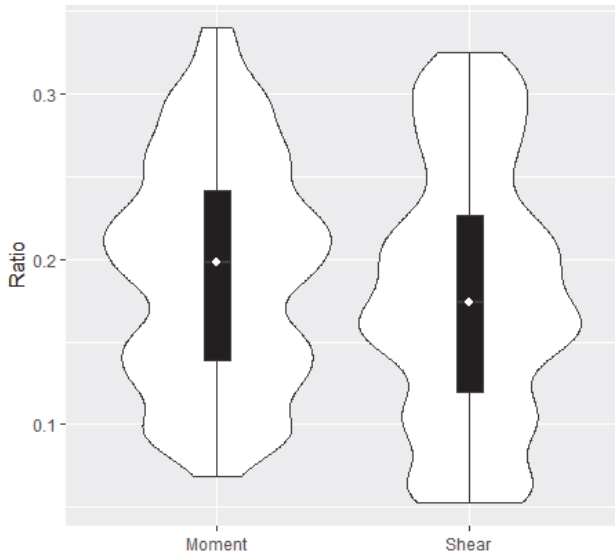


Fig. 6. Percentage of seismic loads in the total load combination.

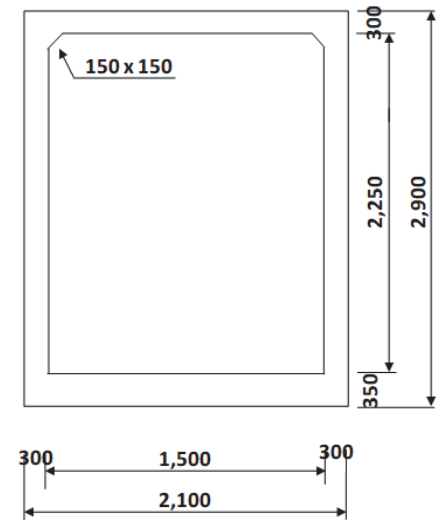


Fig. 8. Sectional dimension of a power cable tunnel specimen 2.

B. 내진안전성 확보 원인 분석

평가대상 전력구 100개소들은 설계 시 내진설계가 반영되어 있지 않거나, 내진 특등급(0.22 g)의 지진하중에 대한 검토가 이루어지지 않았다. 그러나 내진성능 평가 결과 Fig. 4 및 TABLE 2와 같이 최소 0.26 g 이상의 내진성능을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한 TABLE 4와 같이 연약지반에 운영중인 전력구의 경우에도 보수적인 응답변위법으로 내진성능 평가를 수행하였으나 내진안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

이에 대한 원인을 규명하고자 전력구 100개소의 내진성능 평가 결과를 토대로 Eq. (1)의 전체 지진하중조합 대비 순수 지진하중이 차지하는 비율을 분석해 보았다. 즉 지진이 발생하지 않아도 전력구에 상시적으로 작용하는 자중 D , 차량에 의한 활하중 L , 토압 및 지하수에 의한 수압 H 를 상시하중으로 표현하여, 전체 지진하중 조합 대비 상시하중($D+L+H$)과 지진하중(E)의 비중을 단면력을 이용하여 확인해 보고자 하였다.

그 결과 Fig. 6과 같이 모멘트는 7-34%의 분포를 나타냈으며, 주로 19-23%에 많이 분포하고 있었다. 전단력의 경우에는 5-32%의 분포를 나타냈으며, 주로 13-21%에 많이 분포하였다. 결론적으로, 0.22 g 수준의 지진하중에 의한 단면력은 상시하중을 포함한 지진하중조합에 의한 값의 20% 내외로서 크지 않으며, 내진성능 평가 시 상시하중에 의해서 주로 전력구의 내진성능이 결정된다는 것을 알 수 있었다.

전력구의 설계 시 콘크리트 구조기준에 따라 자중, 활하중, 토압 및 수압 등 상시하중은 최대 20-40%의 하중계수를 적용하게 된다. 이에 반해, 전력구의 내진설계 또는 내진성능 평가 시 붕괴 방지수준에서의 지진하중조합은 하중계수가 1.0이며, 0.22 g 수준의 지진하중의 비중이 전체 하중조합의 20% 내외로 작은 수준이다. 따라서 내진설계가 반영되어 있지 않은 전력구라 할지라도, 설계 시 상시하중조합 조건이 지진하중조합 조건보다 지배적일 수 있으므로, 0.22 g 수준의 지진하중 하에서는 전력구가 내진안전성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

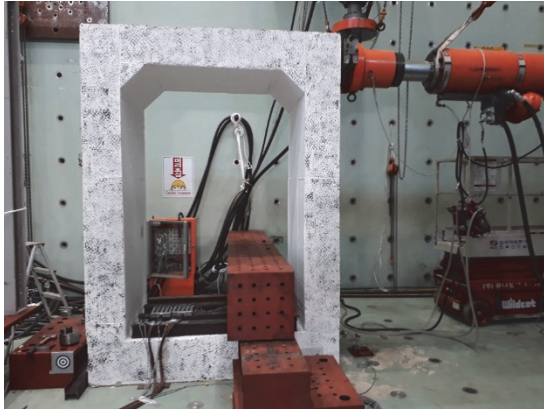


Fig. 9. Structural test method and setting of the specimen.



Fig. 10. The setting method for the loading bearing part.

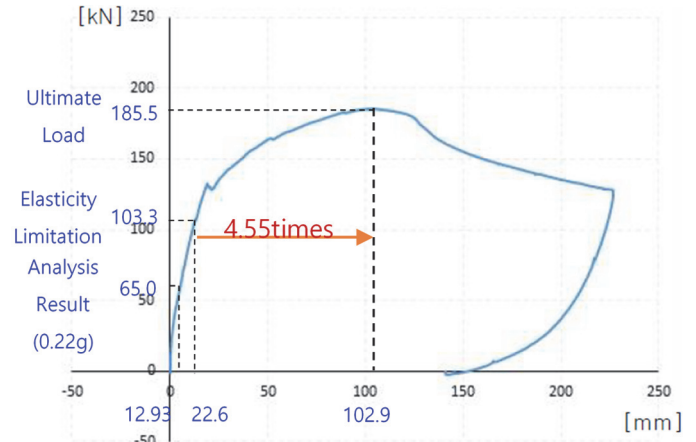


Fig. 11. Load-displacement curve of the specimen 1.

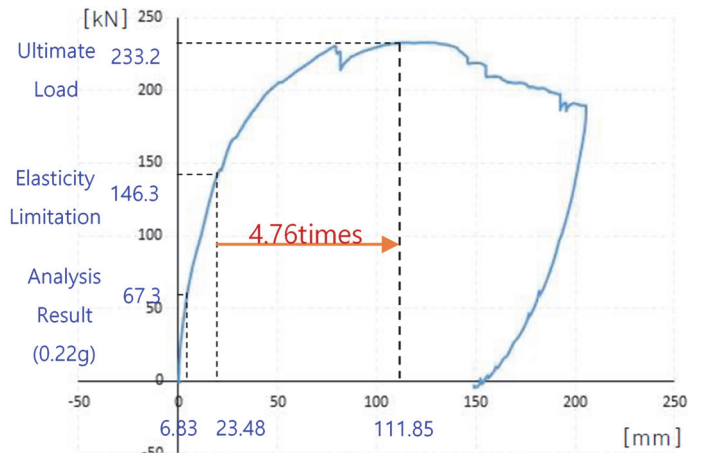


Fig. 12. Load-displacement curve of the specimen 2.

V. 내진성능 검증 구조실험

A. 구조실험 개요 및 방법

전력구의 응답변위법에 의한 내진성능 평가 결과를 검증하고 내진안전성을 확인하기 위해 실규모 구조실험을 수행하였다. 한편 송배전설비 내진설계 실무지침(2014)에는 전력구의 응답수정계수로 기둥이나 보는 3을, 벽식 구조는 2를 사용하도록 제시하고 있다. 따라서 전력구에 기둥과 보에 대한 내용을 적용할 수 없어 내진성능 평가 시 모멘트에 대해 보수적으로 2의 응답수정계수를 적용하였는데, 이에 대한 적정성을 실험을 통해 확인하고자 하였다.

실험체는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 2개를 선정하였는데, 169개의 단면 중 가장 일반적인 제원의 실험체 1(용춘 S/S 전력구)과 슬래브 너비 대비 높이가 큰 제원의 실험체 2(봉무분기 전력구)를 대상으로 하였다. 실험체의 단면 제원, 철근 배근 및 콘크리트 압축강도 등은 실제 전력구의 설계도면을 참조하여 제작하였다. 실험체의 길이는 1 m로 제작하였다.

Fig. 9와 같이 실험체의 상부 슬래브를 1,000 kN 용량의 유압 가력기를 이용하여 Push-over로 등분포 가력하고, 변위 제어를 통해 전력구가 파괴될 때까지 구조실험을 수행하였다. 여기서 실험체 하부를 고정하고, 상부 슬래브에 변위를 가하여 미는 것은 응답변위법에서 전력구에 작용하는 상대변위 하중을 모사한 것이다. 제어는 1.5 mm/min의 속도로 하였으며, 응답변위법에 의한 변형 및

부재력을 모사하고 상단부의 등가력 부위의 국부적인 파괴를 방지하기 위해 Fig. 10과 같이 강판을 부착하고 가력을 수행하였다. 또한 하중 가력 시 실험체의 슬라이딩과 들림을 막기 위하여 강제지그를 이용한 경계조건을 구현하였다.

B. 구조실험 결과

두 실험체의 구조실험 결과를 하중-변위 그래프로 정리하면 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다. 실험체 1은 103.3 kN의 하중에서 항복이 발생하였으며, 극한하중은 185.5 kN이었다. 한편 실험체 2는 146.3 kN에서 항복이 발생하였으며, 극한하중은 233.2 kN이었다.

수치해석에 의한 내진성능 평가 시 0.22 g의 지진하중하에서 시험체 1은 12.93 mm, 시험체 2는 6.83 mm의 최대 상대변위가 산정되었는데, 이는 각각 65.0 kN 및 67.3 kN의 하중 수준으로 모두 탄성범위 이내(항복강도의 63 및 46% 이내)에 해당된다. 따라서 두 시험체는 내진 안전성을 확보하고 있으며, 응답변위법을 통한 내진성능 평가 결과의 적정성 및 보수성을 확인할 수 있었다.

Fig. 13부터 Fig. 15까지 구조시험에 의한 두 시험체의 파괴형상을 보여주고 있다.

한편 구조실험 결과 확인된 극한변위와 항복변위값을 이용하



Fig. 13. Fragmentation of the specimen 1 by the test.



Fig. 15. Fragmentation of the bottom of specimen 1 wall.



Fig. 14. Fragmentation of the specimen 2 by the test.

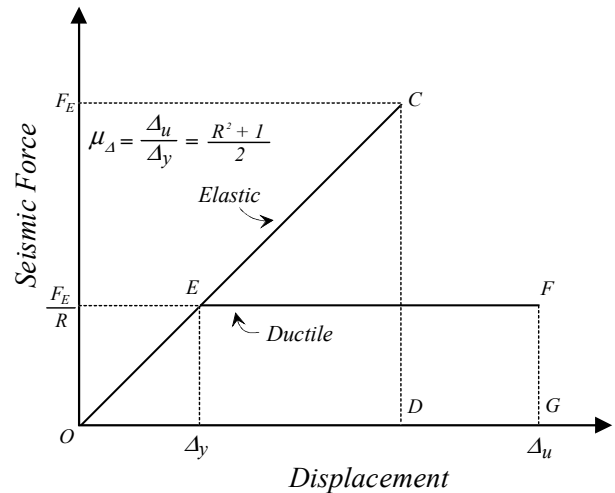


Fig. 14. Equal-energy principle.

TABLE 5

Response Modification Factor Based on the Structural Test Results

Specimen	Displacement(mm)		Displacement Ductility	Response Modification Factor
	Yield	Ultimate		
1	22.60	102.90	4.55	2.84
2	23.48	111.85	4.76	2.92

여 Fig. 16과 같이 Newmark와 Hall (1982)의 등가 에너지의 원리를 이용한 계산식으로 변위연성도와 응답수정계수를 계산하면, TABLE 5와 같다.

구조실험 결과에 의해 산정한 응답수정계수는 내진성능 평가 시 사용한 2.0보다 큰 값으로 나타났으므로, 전력구의 내진 안전성 및 수치해석 결과의 보수성을 확인할 수 있었다. 본 실험은 응답변위법에 의한 변위하중을 단조가력으로 모사한 것으로 이 방법의 보수성 및 전력구의 내진안전성을 검증하기 위해 수행되었다. 산출된 응답수정계수가 2.0을 40% 이상 초과하므로, 실제 지진의 양방향 하중효과가 반영되어도 해석 시 고려한 응답수정계수가 보수적이라는 결과에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

VI. Conclusion

본 논문에서는 내진설계가 고려되어 있지 않은 전력구를 포함한 기설 개착식 전력구 100개소를 대상으로, 산업통상자원부의 요구수준(내진 특등급, 0.22 g)을 만족하는지 확인하기 위하여 내진성능 평가를 수행하였다. 또한, 단일 코사인 이론 및 응답변위법에 의한 지중 전력구의 내진성능 평가 방법 및 결과에 대한 타당성을 확인하고, 전력구의 내진 안전성을 검증하기 위한 지진응답 해석 및 실규모 구조실험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 평가대상 전력구들의 내진성능 평가 결과 모든 전력구는 정부의 요구수준인 0.22 g를 만족하였으며, 대부분 0.3-1 g의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다.
- (2) 토층부지의 고유주기가 0.4초 이상인 연약지반에 운영중인 전력구를 대상으로, 단일 코사인 이론 및 응답변위법에 의한 내진성능 평가 방법의 타당성을 검토하기 위해, 지진응답 해석에 의한 결과와 비교를 수행하였다. 그 결과 지진응답 해석에 의한 상대변위가 응답변위법에 의한 결과의 38-94% 수준

으로 나타나 본 연구에서 수행한 내진성능 평가 방법의 보수성을 확인하였다.

- (3) 지진에 의한 순수 단면력은 상시하중을 포함한 지진하중조합에 의한 값의 20% 내외로 비중이 낮았다. 한편 전력구의 설계 시에는 상시하중조합에 하중 할증계수가 적용되나 지진하중조합에는 고려되지 않아 0.22 g의 지진 수준에서는 지진하중보다 상시하중이 지배적임을 알 수 있었다.
- (4) 응답변위법에 의한 내진성능 평가 결과 및 전력구의 내진 안전성을 검증하기 위해 2개의 실험체를 제작하고 지진 시 전력구에 작용하는 상대변위 하중을 모사한 실규모 구조실험을 수행하였다. 그 결과 변위연성도를 고려한 응답수정계수 산정 값이 내진성능 평가 시 고려한 값을 초과하는 것으로 나타나 내진성능 평가 방법의 보수성 및 전력구의 내진 안전성을 확인할 수 있었다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R16SA06.

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 주력연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R16SA06).

References

- [1] The Ministry of Land, Infrastructure & Transportation, "Design Criteria for Common Utility Tunnels," 2016.
- [2] The Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs, "Design Criteria for Concrete Structures," 2012.
- [3] Korea Electric Power Corporation, "Seismic Design Guidelines for Transmission & Distribution Facilities," May 2014.
- [4] The Ministry of Interior & Safety, "Common Application of Seismic Design Criteria," Apr. 2017.
- [5] KEPCO Research Institute, "Study on Seismic Reinforcement Plans for Existing Transmission and Distribution Cable Tunnels and Electric Facilities around Yangsan Fault (TR 9346 S2019 0195)," pp. 3-150, Aug. 2019.
- [6] Duhee Park, Jongho Shin, Seung Yun, "Seismic Analysis of Tunnels in Transverse Direction Part I: Estimation of Seismic Tunnel Response via Method of Seismic Displacement," Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 6, pp. 57-70, Jun. 2010.
- [7] Yongmin Kim, Sangseom Jeong, Yonghee Lee, Jungbum Jang, "Seismic Design of Vertical Shaft using Response Displacement Method," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 6C, pp. 241-253, Nov. 2010.
- [8] Hojune Ann, Sanggeun Song, Daehong Min, Sangmi An, Jungsik Kong, "Experimental and Analytical Evaluation of the Seismic Performance of a Concrete Box Structure Strengthened with Pre-flexed Members," Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 29, No. 5, pp. 397-403, Oct. 2016.
- [9] Choonghyun Kang, Jungwon Huh, Innjoon Park, Kyeongmin Hwang, Jungbum Jang, "A Simple Seismic Vulnerability Sorting Method for Electric Power Utility Tunnels," Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 22, No. 5, pp. 110-118, Sep. 2018.