

콘크리트 옹벽의 지진여유도 평가

Seismic Margin Assessment of Concrete Retaining Walls

박 두 희[†] · 백 종 민¹⁾ · 박 인 준²⁾ · 황 경 민³⁾ · 장 정 범⁴⁾

Duhee Park · Jongmin Baeg · Inn-Joon Park · Kyeongmin Hwang · Jungbum Jang

Received: May 9th, 2019; Revised: June 3rd, 2019; Accepted: July 1st, 2019

ABSTRACT : In recent Gyeongju and Pohang earthquakes, motions that exceed the design ground motion were recorded. This has led to adjustments to the design earthquake intensity in selected design guidelines. An increment in the design intensity requires reevaluation of all associated facilities, requiring extensive time and cost. Firstly, the seismic factor of safety of built concrete retaining walls are calculated. Secondly, the seismic margin of concrete retaining walls is evaluated. The design sections of concrete walls built at power plants and available site investigation reports are utilized. Widely used pseudo-static analysis method is used to evaluate the seismic performance. It is shown that all concrete walls are safe against the adjusted design ground motion. To determine the seismic margin of concrete walls, the critical accelerations, which is defined as the acceleration that causes the seismic factor of safety to exceed the allowable value, are calculated. The critical acceleration is calculated as 0.36g~0.8g. The limit accelerations are significantly higher than the design intensity and are demonstrated to have sufficient seismic margin. Therefore, it is concluded that the concrete retaining walls do not need to be reevaluated even if the design demand is increased up to 0.3g.

Keywords : Concrete retaining wall, Seismic performance evaluation, Seismic margin, Mononobe-Okabe method, Factor of safety

요 지 : 최근 발생한 경주지진(16.9.12., $M_L=5.8$) 및 포항지진(17.11.15., $M_L=5.4$)에서 국내의 설계지반운동 수준을 초과하는 진동이 관측되었으며 이를 계기로 설계지반운동이 일부 내진설계지침서에서 개정되었다. 설계지반운동이 조정되면 관련된 모든 시설물의 내진성능을 재평가해야 하며 이를 위해서는 막대한 시간과 비용이 소요된다. 본 연구에서는 일차적으로 조정된 설계지반운동 기준에 대한 기설된 콘크리트 옹벽의 내진성능 확보 여부를 평가하였으며 이차적으로 콘크리트 옹벽의 지진여유도를 평가하였다. 변전소 주변에 기설된 콘크리트 옹벽 단면과 지반주상도를 사용하였으며 지진에 대한 안전율은 유사정적해석법을 사용하여 계산하였다. 평가에 사용된 모든 옹벽은 조정된 설계지반운동에 대해서 충분한 성능을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 나아가 옹벽의 지진여유도를 평가하기 위하여 기준 안전율을 만족하지 못하는 임계가속도를 계산하였다. 임계가속도는 0.36g~0.8g 범위로 설계지반운동을 크게 상회하며 콘크리트 옹벽의 지진여유도는 매우 큰 것으로 분석되었다. 따라서 추후 설계지반운동이 0.3g 이상으로 상향조정되어도 옹벽의 전면적인 재평가는 불필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 콘크리트 옹벽, 내진성능평가, 지진여유도, Mononobe-Okabe 방법, 안전율

1. 서 론

지진 시 옹벽에는 평시의 정토압에 추가적으로 관성력에 의한 동토압이 발생하며 이로 인하여 옹벽의 안정성이 크게 저하될 수 있다. 옹벽의 안정성 평가에는 벽면에 따라 작용하는 지진하중을 등가정적 수평하중으로 치환하여 해석하는 유사정적해석법이 일반적으로 사용된다. 지진하중 산정 시 지반의 증폭 특성을 고려하여 지표면의 최대값 또는 평균값을 적용한다. 유사정적해석법에는 큰 불확실성이 내포되어 있지만 보수적인 방법으로 알려져 있어 내진설계 및 내진성능평가에 가장 널리 사용되고 있다. 국내에서

콘크리트 옹벽은 KDS 11 80 05 콘크리트 옹벽 설계기준(MOLIT, 2016)에 의거하여 내진등급에 따라 암반노두 최대지반가속도(PGA)는 0.11g 또는 0.154g을 적용하며 여기에 지반증폭계수를 곱하여 설계지반운동을 산정한다.

최근 한반도 내륙에서 발생한 경주지진 및 포항지진은 설계지진규모인 6.5보다 작은 지진에서도 설계지반운동을 초과하는 진동이 발생할 수 있으며 시설물의 피해를 유발할 수 있다는 것을 보여주었다. 이를 계기로 한국전력연구원의 송변전설비 내진설계 실무지침서 개정본(KEPRI, 2017)에서는 기설 핵심설비와 일반설비의 최소 내진성능 요구수준이 토층 지표면 $PGA = 0.154g$ 에서 $PGA = 0.22g$ 로 설계지반

† Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Hanyang University (Corresponding Author : dpark@hanyang.ac.kr)

1) Graduate Student, Department of Civil and Environment Engineering, Hanyang University

2) Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

3) Senior Researcher, Korea Electricity Power Corporation Research Institute

4) Principal Researcher, Korea Electricity Power Corporation Research Institute

운동이 조정되었다. 내진설계기준 공통적용사항(MOIS, 2017)의 단주기 지반증폭계수는 지반등급과 S에 따라서 1.2~1.8의 값을 가지므로 PGA 수준이 MOLIT(2016) 기준 대비 모든 경우에서 상향조정 된 것은 아니지만 기설된 콘크리트 옹벽의 재평가가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 내진 I등급 시설로 분류되는 콘크리트 옹벽에 실무지침서 개정본(KEPRI, 2017)에 의거하여 0.22g 이상의 최대지반가속도를 적용하여 내진성능 평가를 수행하였다. 이를 위하여 변전소 주변의 12개 옹벽 단면과 지반주상도를 확보하여 해석에 사용하였으며, 1차원 부지응답해석을 수행하여 지진하중을 계산하였고, 유사정적해석을 수행하여 안정성을 평가하였다.

본 연구에서는 조정된 설계지반운동에 대해서만 기준 안전을 만족여부만을 평가하는 것이 아니라 콘크리트 옹벽의 지진여유도를 분석하였다. 지진여유도는 시설물이 보유하고 있는 잉여 내진성능을 나타내며 콘크리트 옹벽의 지진여유도는 지진 시 기준 안전율을 만족하지 못하는 임계가속도와 설계지반진동의 차이로 정의되었다. 지진여유도는 추후 발생할 가능성이 있는 설계지반운동의 조정에 따른 시설물의 소모적이며 반복적인 재평가를 회피하기 위하여 산정하였다.

2. 지진 시 옹벽 안정성 평가 방법

지진 시 콘크리트 옹벽은 배면에 작용하는 동토압에 대해서 한계상태가 발생하지 않도록 설계해야 하며 활동파괴, 전도파괴, 지지력 파괴, 전체 안정성, 액상화 발생 여부 등을 검토해야 한다(MOLIT, 2016). 활동, 전도, 지지력, 그리고 전체 안정성에 대한 기준 안전율은 Table 1에 정리하였다.

중력식 및 캔틸레버식 콘크리트 옹벽에 가해지는 동토압을 산정하기 위한 다양한 방법 들이 제안되었지만 보수적인 결과를 주는 것으로 알려진 Mononobe-Okabe 유사정적해석법이 가장 널리 사용된다(Fig. 1). Mononobe-Okabe 방법에서는 Coulomb의 주동 또는 수동파괴췌기에 수평 및 연직 지진계수를 적용하여 췌기에 작용하는 힘들의 평형방정식으로부터 벽체에 작용하는 동토압을 계산한다. 연직방향 지반운동이 옹벽의 안정성에 미치는 영향이 제한적이므로 연직지진계수(k_v)는 적용하지 않으며 수평지진계수(k_h)만으로

지진 하중을 계산한다. k_h 는 부지 지표면의 PGA를 나타내는 최대지반가속도(A)로부터 계산할 수 있다.

전술한 바와 같이 기설 핵심설비와 일반설비의 경우 최소 내진성능 요구수준은 $PGA = 0.22g$ 을 적용하도록 제시하고 있다(KEPRI, 2017). PGA는 내진설계기준 공통적용사항(MOIS, 2017)에 제시된 지반등급별 단주기 지반증폭계수를 이용하여 산정하거나 1차원 부지응답해석으로부터 구할 수도 있다. 단주기 증폭계수를 적용하는 경우 기설 핵심설비와 일반설비는 내진 I등급으로 분류되므로 재현주기 1000년 유효수평지반가속도(S)는 0.154g이며 이에 상응하는 토층 지표면에서의 PGA는 0.216~0.236g로써 암반노두를 제외하고는 내진설계지침서의 최소내진성능수준이 상향 조정되었다고 볼 수 없다. 단, 부지응답해석을 사용하는 경우에는 단주기 지반증폭계수보다 증폭이 작게 계산될 수 있으므로 위와 같이 최소내진성능수준을 강제함에 따라 설계기준이 실제로 상향 조정된 것인지를 평가할 필요가 있다. 부지응답해석 결과에 대해서는 다음 절에서 상세 기술하였다. 부지응답해석을 사용하는 경우 KEPRI(2017)은 입력지반운동의 가속도스펙트럼으로 내진설계기준 공통적용사항(MOIS, 2017)의 S1 지반 스펙트럼을 사용할 것을 명시하고 있다.

본 연구에서는 한국전력공사에서 관리 중인 총 9곳의 변전소 주변의 역T형 옹벽 10개소, L자형 옹벽 2개소에 대한 내진성능평가를 수행하였다. 콘크리트 옹벽의 대표 단면도는 Fig. 2에 도시하였으며 제원은 높이(h), 저판폭(B), 근입

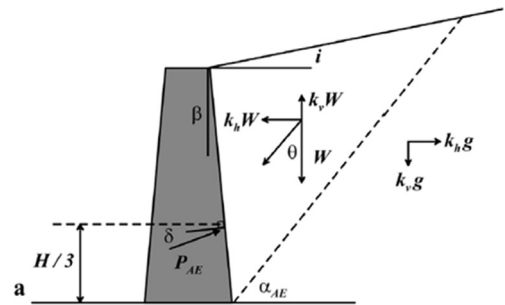


Fig. 1. Schematic of Mononobe-Okabe method (Wagner & Sitar, 2016)

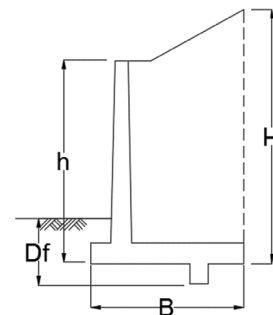


Fig. 2. Section of concrete retaining wall

Table 1. Safety factors of concrete retaining wall (MOLIT, 2016)

Evaluation	Under static load	Under earthquake load
Sliding	1.5/2.0	1.2
Overturning	2.0	1.5
Bearing capacity	3.0	2.0
Overall stability	1.2 ~ 1.5	1.1

깊이(D_f), 배면토사높이(H) 등이다. 각 옹벽의 제원은 Table 2에 정리하였다.

옹벽의 지진성능을 평가하는 플로우차트는 Fig. 3에 도시하였다. 평가에서 사용될 최대지반가속도(A)를 산정하기 위하여 1차원 부지응답해석을 수행하였으며 이를 통하여 계산된 지표면에서의 최대지반가속도(A_{1D})가 최소설계가속도인 0.22g보다 작을 경우에는 0.22g를 적용하였으며 A_{1D} 가 0.22g를 초과하는 경우는 계산된 값을 평가에 사용하였다.

부지응답해석에는 3개의 계측 지진파가 사용되었다. 지반운동의 최대지반가속도(PGA)는 S1 지반 평균재현주기 1000년 지진에 부합하는 0.154g로 조정하였으며 설계스펙트럼에 상응하도록 스펙트럼 매칭을 수행하였다. 설계스펙트럼

은 KEPRI(2017)에서 제시한 바와 같이 내진설계기준 공통 적용사항(MOIS, 2017)의 표준설계응답스펙트럼을 사용하였다. 스펙트럼 매칭에는 시간영역에서 웨이블릿 변환을 이용하여 지진파형을 조정하는 소프트웨어인 RspMatch2009 (Al Atik & Abrahamson, 2010)를 사용하였다. Fig. 4에는 조정된 시간이력과 함께 가속도스펙트럼과 표준가속도스펙트럼을 비교하였다. 비교 결과, 매칭된 지진파는 표준스펙트럼과 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 지층별 비선형 곡선으로는 Darendeli(2001)의 곡선을 사용하였다. 각 옹벽 부지의 표준관입시험(SPT) N치 추상도를 사용하여 전단파속도와 기타 지반정수를 산정하였다. 전단파 속도는 KEPRI(2017)에 따라 Sun et al.(2013), Jeong & Lee(2008), 그리고 Kim et al.(2003)의 경험식 결과 중 가장 작은 값을 사용하였다. 각 식은 다음과 같다.

$$V_s = 65.64N^{0.407} \quad (\text{Sun et al., 2013}) \quad (1)$$

$$V_s = 144.7N^{0.308} \quad (\text{Jeong \& Lee, 2008}) \quad (2)$$

$$V_s = 98.38N^{0.29} \quad (\text{Kim et al., 2003}) \quad (3)$$

여기서, V_s 는 전단파 속도, N 은 표준관입시험 관입저항치 (SPT-N값) 이다.

N치가 31 이하의 경우 계산된 전단파 속도 중 Eq. (1)의 값이 가장 작았으며, N치가 32 이상인 경우 Eq. (3)의 값이 가장 작았다. 이에 따라 적용된 옹벽 부지별 전단파속도 추상도는 Fig. 5에 도시하였다. 계산된 옹벽 부지별 최대가속도는 Table 3에 정리하였다. 비교 결과, 지반의 추상도에 따라 계산된 결과에 큰 차이가 발생하여 0.115g에서 0.243g까지의 넓은 범위로 나타났다. 또한 KEPRI(2017)에서 제시한 지반등급별 PGA와 비교하였으며 기준과 대부분 유사한 것으로 나타났다. 12개의 부지 중에서 KEPRI(2017)의 제시 기준과 차이가 10% 이상 발생하는 부지는 단 3개의 부지이며 이 중에서 옹벽 2와 9에서 각각 PGA비가 0.579와 0.622로 제시 기준에 비하여 큰 차이로 작게 계산되었다. 단 1개의 부지(옹벽 6)에서 제시 기준 대비 10% 이상 크게 계산되었다. 즉, 12개의 부지 중에서 1개의 부지에서만 제시 기준의 최소성능수준을 초과하며 나머지 모든 사례에서는 KEPRI(2017)의 기준이 보수적인 결과를 제시하는 것으로 나타났다. 제한된 해석으로 도출된 결론이기는 하나, KEPRI(2017)의 지반등급별 증폭계수로 최대하중을 산정하는 것은 대부분 보수적인 결과를 제시하는 것으로 분석되었다.

옹벽의 안전율은 전술한 대로 Mononobe-Okabe 방법을 사용하여 평가하였다. 대상 옹벽의 k_h 는 PGA로부터 산정하

Table 2. Dimensions of inverted T-type retaining walls (h = height of wall, B = width of wall base, H = height of backfill, D_f = depth of penetration)

Wall number	h (m)	B (m)	H (m)	D_f (m)
1	4.0	3.0	4.0	1.2
2	6.0	5.7	6.0	1.5
3	4.0	3.0	5.0	1.2
4	6.0	4.1	7.5	1.45
5	3.0	2.0	3.5	1.4
6	3.0	3.2	4.4	1.4
7	4.0	3.0	5.0	1.4
8	5.2	3.6	5.2	1.0
9	4.5	3.4	5.5	1.45
10	5.0	3.0	5.4	1.3
11	3.0	2.4	4.0	1.4
12	4.0	3.2	5.5	1.4

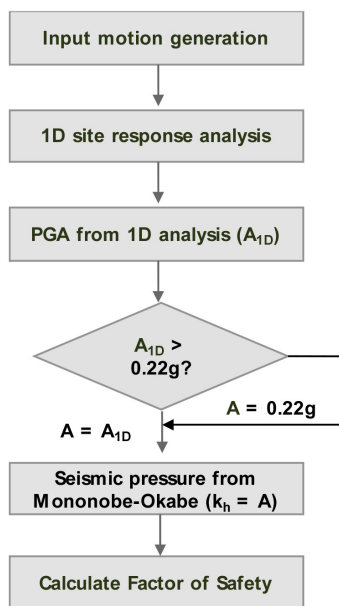


Fig. 3. Flow chart for evaluation of the seismic performance of concrete walls

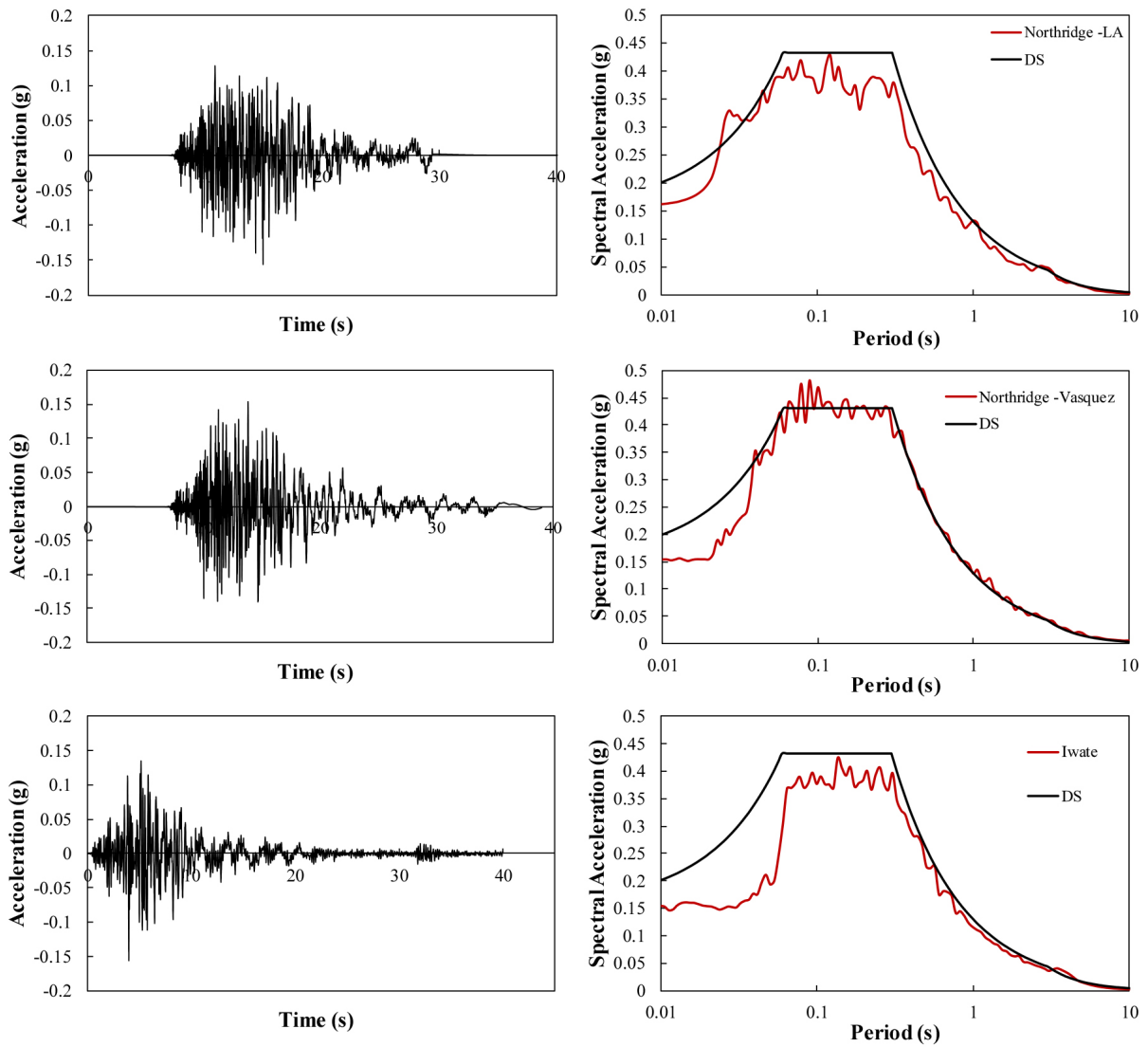


Fig. 4. Spectrum matched acceleration time histories and 5% damped response spectra of input ground motions

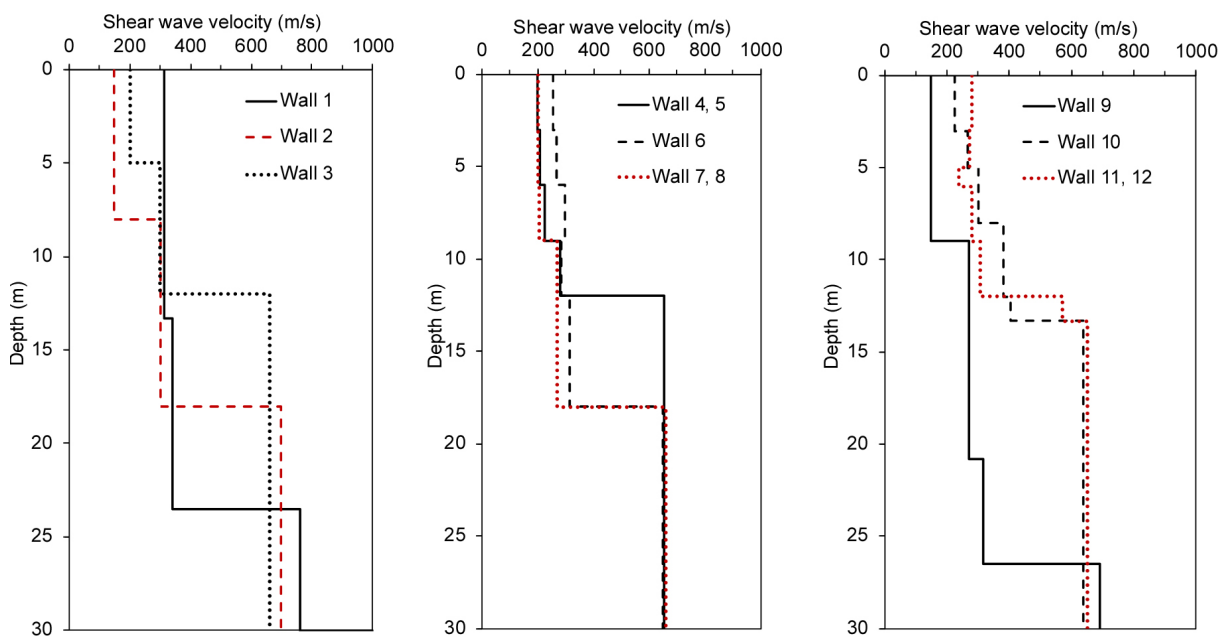


Fig. 5. Shear wave velocity profiles of wall sites

Table 3. Comparison of calculated PGA with KEPRI PGA

Wall	Site class	Calculated PGA				KEPRI PGA
		GMI	GM2	GM3	Peak PGA	
1	S ₄	0.228	0.223	0.225	0.228	0.230
2	S ₃	0.142	0.124	0.115	0.142	0.245
3	S ₃	0.251	0.243	0.221	0.251	0.245
4	S ₃	0.22	0.221	0.218	0.221	0.245
5	S ₃	0.22	0.221	0.218	0.221	0.245
6	S ₂	0.227	0.243	0.245	0.245	0.216
7	S ₃	0.241	0.228	0.244	0.244	0.245
8	S ₃	0.241	0.228	0.244	0.244	0.245
9	S ₄	0.137	0.143	0.135	0.143	0.230
10	S ₂	0.221	0.212	0.208	0.221	0.216
11	S ₂	0.204	0.206	0.218	0.218	0.216
12	S ₂	0.204	0.206	0.218	0.218	0.216

였으며 연직지반운동은 고려하지 않았다. 지반의 마찰각(ϕ)은 옹벽 저면 깊이까지의 평균 SPT N치로부터 산정하였으며 Dunham(1954), Meyerhof(1956), Peck et al.(1953)의 경험식 중에서 가장 보수적인 값을 적용하였다. 활동에 대한 안정성을 평가하기 위한 마찰계수(δ)는 $\frac{2}{3}\phi$ 를 적용하였다. 뒷채움재의 단위중량은 20kN/m^3 을 사용하였다.

3. 옹벽 내진성능 및 지진여유도 평가 결과

대상 옹벽 단면에 대하여 안정성 평가를 실시하여 계산된 전도, 지지력, 활동 안전율 결과는 Table 4에 정리하였다. 앞서 기술한 대로, KEPRI(2017)이 제시한 설계지반운동은 과거 기준 대비 크게 상향 조정되지는 않았으며 이는 계산된 안전율로도 확인할 수 있다. 지진 시 옹벽의 전도, 지지력, 활동 안전율 모두 설계기준 허용치 대비 크게 높으

며 평가 대상 콘크리트 옹벽은 모두 충분한 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 옹벽의 폭, 높이 등에 따라 전도, 지지력, 활동 중에서 가장 취약한 모드가 결정되는 것으로 분석되었다.

나아가 옹벽의 잉여 내진성능 수준을 의미하는 지진여유도를 평가하기 위하여 안전율이 허용 수준으로 감소하는 최대지반가속도를 계산하였으며 이를 임계가속도로 명하였다. 임계가속도는 Table 4에 정리하였다. 평가 결과, 임계가속도는 $0.36\sim 0.80\text{g}$ 의 범위를 보이며 국내 설계지반운동보다 현격하게 큰 것으로 계산되었다. 지진여유도는 $0.144\sim 0.55\text{g}$ 로 높은 수준이며 최소지반가속도가 0.36g 까지 상향 조정되어도 문제가 없는 것으로 나타났다. 총 12개의 옹벽 중에서 25%의 임계가속도가 $0.3\sim 0.4\text{g}$ 범위이며, 42%가 $0.4\sim 0.5\text{g}$ 이며 나머지 33%가 0.5g 이상이다. 임계가속도는 전도에 의해서 결정되는 것으로 나타났다. 전도에 대한 안전율이 2.0 미만인 경우, 모두 임계가속도가 0.4g 보다 작게 계산되었다. 반면 지지력 안전율은 지진여유도를 평가하는 데 있어서 최적의 지표는 아닌 것으로 나타났다. 임계가속도가 0.36g 로 최저일 경우에도 지지력 안전율은 4.0으로 매우 높게 계산되었다. 지진 여유도 평가결과, 설계지반운동이 0.36g 까지 상향조정되어도 옹벽의 내진성능을 재평가할 필요는 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경주 및 포항 지진 이후 설계지반운동이 조정된 내진설계지침(KEPRI, 2017)을 기준으로 한국전력공사에서 관리 중인 변전소 주변 12개의 역 T형과 L형 콘크리트 옹벽의 내진성능평가를 수행하였다. 이를 위해 최소지

Table 4. Calculated safety factors and critical accelerations of concrete retaining walls

Wall number	Overturning	Bearing capacity	Sliding	Critical acceleration (g)	Safety margin (g)
1	2.82	3.67	2.60	0.54	0.31
2	4.10	4.70	2.19	0.80	0.56
3	2.18	3.40	1.89	0.43	0.19
4	1.98	2.49	1.64	0.38	0.14
5	2.07	4.46	2.56	0.41	0.17
6	2.95	5.94	1.96	0.68	0.46
7	2.72	4.43	2.29	0.51	0.27
8	2.56	3.22	1.92	0.45	0.21
9	2.13	3.22	1.83	0.42	0.19
10	1.85	3.25	1.81	0.37	0.15
11	2.29	3.87	2.35	0.44	0.22
12	1.74	4.01	1.72	0.36	0.14

반운동수준이 $PGA = 0.22g$ 로 조정된 내진설계지침에 대한 기설된 옹벽의 내진성능 만족 여부를 검토하였다. 최소운동 수준의 크기 수준을 평가하기 위하여 전력구 부지의 지반주 상도를 사용하여 1차원 부지응답해석을 수행하여 계산된 결과를 비교하였다. 평가 결과, 개정된 내진설계지침(KEPRI, 2017)은 MOIS(2017)의 지반등급과 지반증폭계수를 적용하는 경우, 암반에 시공된 옹벽을 제외하고는 설계지반운동 수준이 크게 상향조정되지 않은 것으로 나타났다. 부지응답 해석을 수행하는 경우, 약 17%의 부지에서 개정된 지침에 비하여 작은 PGA가 계산된 반면, 75%의 경우 개정된 지침과 오차범위가 10% 이내이며 단 1개의 부지(8%)에서 지침 대비 큰 가속도가 계산되었다. 결과적으로 개정된 지침은 대부분의 경우, 부지응답해석 대비 유사하거나 보수적인 결과를 제시하는 것으로 나타났다. 개정된 지침을 이용하여 기설된 옹벽의 안정성을 평가한 결과, 모든 옹벽에서 허용 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 설계지반운동이 크게 상향조정되지 않았다는 점을 감안하면 당연한 결과이다. 하지만 주목할 만한 특징은 옹벽의 안전율이 허용값 대비 상당히 크다는 점이다.

나아가 옹벽의 지진여유도를 평가하기 위하여 임계가속도를 계산하였다. 임계가속도는 $0.36 \sim 0.8g$ 로 국내 설계지반운동보다 현격하게 큰 것으로 계산되었다. 임계가속도는 전도에 의해서 결정되며 전도에 대한 안전율이 2.0 미만인 경우 모두 임계가속도가 $0.4g$ 보다 작게 계산된 반면 지지력 안전율은 임계가속도와 상관이 낮은 것으로 나타났다. 지진여유도는 $0.14 \sim 0.56g$ 로 매우 높으며 설계지반운동이 $0.3g$ 이상으로 상향조정되어도 옹벽의 내진성능 확보에 문제가 없는 것으로 나타났다.

감사의 글

This research was supported by KEPCO. The authors gratefully acknowledge the financial support.

References

1. Al Atik, L. and Abrahamson, N. (2010), An improved method for nonstationary spectral matching, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 3, pp. 601~617.
2. Darendeli, M. B. (2001), Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, Ph D. thesis, University of Texas at Austin.
3. Dunham, J. W. (1954), Pile foundations for building, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 80, No. 1, pp. 385-1~21.
4. Jeong, N. H. and Lee, C. K. (2008), Investigation of S-wave velocity based on SPS field tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, No. 10, pp. 161~174 (In Korean).
5. Kim, D. S., Bang, E. S. and Seo, W. S. (2003), Evaluation of shear wave velocity profiles by performing uphole test using SPT, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 135~146 (In Korean).
6. KEPRI (2017), Seismic design code of electric power transmission and substation facilities for practicing engineers – revised edition, Korea Electric Power Research Institute (In Korean).
7. Meyerhof, G. G. (1956), Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 82, No. 1, pp. 866-1~19.
8. MOLIT (2016), KDS 11 80 05 Design code of concrete retaining walls, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (In Korean).
9. MOIS (2017), Seismic design code, Ministry of the Interior and Safety (In Korean).
10. Peck, R. B., Hanson, W. E. and Thornburn, T. H. (1953), *Foundation Engineering*, John Wiley and Sons, pp. 222.
11. Sun, C. G., Cho, C. S., Son, M. and Shin, J. S. (2013), Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results for Korean soil deposits, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 170, No. 3, pp. 271~281.
12. Wagner, N. and Sitar, N. (2016), On seismic response of stiff and flexible retaining structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 91, pp. 284~293.