

국내 옹벽의 유사정적 내진설계기준 개선방향에 대한 고찰

A Discussion on the Improvement of Pseudo-Static Seismic Design Criteria of Retaining Wall in Domestic

조성배¹⁾ · 하정곤¹⁾ · 이진선²⁾ · 김동수^{1)*}

Jo, Seong-Bae¹⁾ · Ha, Jeong Gon¹⁾ · Lee, Jin-sun²⁾ · Kim, Dong-Soo^{1)*}

¹⁾한국과학기술원(KAIST) 건설 및 환경공학화, ²⁾원광대학교 토목환경공학과

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, ²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang Univ.

/ A B S T R A C T /

This paper reviews the current seismic design code and research for dynamic earth pressure on retaining structures. Domestic design codes do not clearly define the estimation of dynamic earth pressure and give different comments for seismic coefficient, wall inertia and distribution of dynamic earth pressure using Mononobe-Okabe method. AASHTO has been revised reflecting current research and aims for effective seismic design. Various design codes are analyzed to compare their performance and economic efficiency. The results are used to make improvement of current domestic seismic design code. Further, it is concluded that the experimental investigation is also needed to verify and improve domestic seismic code for dynamic earth pressure.

Key words: Seismic Design, Dynamic Earth Pressure, Retaining Wall, Mononobe-Okabe method

1. 서론

국내 사회기반시설물의 내진설계 개념은 건축물을 대상으로 1962년 건축법에 선연적으로 규정되었으며 이후 1988년 [건축물의 구조기준 등에 관한 규칙]이 개정되면서 건축물에서의 내진설계가 의무화 되었다. 이를 바탕으로 고속철도(1991), 도로교(1992), 댐(1993) 과 같이 중요 시설물에 대해서 별도의 내진설계 기준이 제정되어 해당 시설물에 대하여 내진설계가 의무화되었다. 1995년 일본의 고베지진을 계기로 정부는 [자연재해대책법](1996)을 개정하고 소관 부처에 내진설계기준을 설정하도록 하였다. 이에 건설교통부(현 국토교통부)에서는 내진설계 상위 개념인 내진설계기준연구II(건설교통부, 1997)를 바탕으로 여러 부처와 산하 기관에 각 시설물별 내진설계기준을 제정하도록 조치하였다[1].

옹벽은 모든 토목구조물 중에서 가장 기본적이고 오래된 구조물로서 중력식, 역T형, 캔틸레버 형식의 옹벽이 주로 사용되고 있으며 국토교통부에서는 도로옹벽표준도[2]에 옹벽의 내진설계를 예제로 제공하고 있다. 그 밖에도 현재 도로교[3], 구조물기초[4] 및 항만 및 어항[5] 설계기준 등에서

옹벽의 내진설계를 제시하고 있으며 지속적인 개정이 이루어지고 있다. 하지만 설계기준에 제시된 대부분의 상세규정은 관련 연구의 부족으로 인하여 주로IBC, AASHTO 등의 해외 설계기준을 준용해 왔으며 1997년 마련된 내진설계기준연구III[6] 상위개념이 강제성을 갖지 않기 때문에 각각의 설계기준에 상이한 내용이 다수 존재한다.

옹벽의 내진설계에서 가장 중요한 요소는 지진 시 증가하는 횡토압이며 국내의 대부분의 기준에서는 Mononobe-Okabe 공식(이하 M-O 공식)[7,8] 및 Seed and Whitman 공식(이하 S-W 공식)[9]으로 동토압을 손쉽게 평가할 수 있으나, 설계지진계수(k_h) 및 동적토압의 분포 등에 대해서는 명확히 규명이 이루어지지 않아 현재까지 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 이 외에도 지반의 지지력은 일반적인 지지력 이론(Terzaghi, Meyerhof, Hansen 등)의 상시 지지력 계수를 적용하고 있으나 동적 지지력 계수를 적용할 시에는 국토해양부에서 제공하고 있는 옹벽 표준도에서 지지력 파괴가 발생함을 분석한 바 있다 [10].

이에 본 논문에서는 옹벽구조물 중 역T형 옹벽에 대하여 동적토압을 산정하기 위한 국내 설계기준 현황을 분석하고 외국의 내진설계기준과 최신 연구동향을 바탕으로 향후 국내 내진설계기준의 개선방향을 제시하였다. 또한 각 기관 및 협회별 내진설계기준에 상이하게 제시되어 있는 설계지진계수, 동적토압분포 등이 옹벽의 외적안정(Global Stability) 및 부재력에 미치는 영향을 예제를 통해 분석하였다.

*Corresponding author: Kim, Dong-Soo

E-mail: dskim@kaist.ac.kr

(Received 30 September 2014; Revised 12 November 2014; Accepted 13 November 2014)

2. 국내외 내진설계기준 (옹벽)

2.1 Mononobe-Okabe 방법

M-O 방법은 1923년 Kanto 지진 이후 Okabe[7], Mononobe and Matsuo[8] 가 제안한 지진 시 동적토압 산정 방법이다. M-O 방법은 뒤채움 지반이 건조사질토인 중력식 옹벽을 대상으로 제안되었지만 현재 국내외 옹벽 내진설계에서 옹벽의 형태와 상관없이 지진시 횡토압을 산정하는 방법으로 사용되고 있다. M-O 방법은 Coulomb 의 토압이론을 확장시킨 방법으로 지진 시 파괴 흩째기의 관성력을 추가적인 정적 힘으로 고려하여 한계상태에서의 힘의 평형으로 지진 시 작용하는 동적 토압을 식 (1), (2) 와 같이 산정하며 다음과 같은 가정사항을 갖는다.

- 가정 1) 벽체는 최소 주동토압이 발생할 정도로 충분한 변위가 발생한다.
- 가정 2) 지진 시 파괴 흩째기는 동일한 가속도를 받는 강체로 가정한다.
- 가정 3) 뒤채움 지반은 Mohr-Coulomb 의 파괴기준을 따르며 직선의 파괴면에서 최대 전단응력이 발생한다.

$$P_{AE} = 0.5\gamma H^2 K_{AE}(1 - k_v) \tag{1}$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta)\cos(i - \beta)}} \right]^2} \tag{2}$$

여기서, γ 는 흙의 단위 중량, H 는 옹벽 벽체 높이, ϕ 는 뒤채움 지반의 내부 마찰각, δ 는 흩째기면의 마찰각, β 는 벽체의 수직 기울기, k_h 는 수평 지진 계수, k_v 는 수직 지진계수, θ 는 $\tan^{-1}(k_h/(1 - k_v))$ 이다.

정적토압과 동적토압의 전체 크기를 제시한 M-O 방법과 달리 S-W 방법은 식 (3), (4) 와 같이 동적 토력(seismic force, 동적토압의 합)의 증가분을 따로 분리시켜 M-O 방법을 간편화 하였다.

$$\Delta P_{AE} = \frac{1}{2}\gamma H^2 \Delta K_{AE} \tag{3}$$

$$\Delta K_{AE} = \frac{3}{4}k_h \tag{4}$$

Coulomb 의 토압이론을 사용한 M-O 방법은 지진시 토력의 총 합력만을 제시할 뿐 토압의 분포 및 작용점에 대해 언급하지 않은 반면에 S-W 방법은 1g 진동대 실험을 통하여 동적토력의 작용점을 옹벽 바닥으로부터 0.6H로 평가하여 역삼각형 형태의 동적토압 분포를 제안하였으며 이후 많은 설계기준에서 사용하고 있다.

2.2 국내

2.2.1 국내설계기준

구조물기초설계기준[4]에서는 옹벽의 내진해석을 위하여 M-O방법을

사용하고 설계지진가속도($k_h=a_{max}/g, g=9.81m/s^2$)로는 지표면 자유장 최대가속도(PGA)로, 해당 지역의 보통암 암반 노두 설계지진계수에 그 지역의 지반 증폭 계수를 곱하여 결정하도록 하고 있다. 통상적으로 지표면 최대 가속도는 옹벽하단 지표면을 기준으로 산정하고 있으나 이에 대한 명확한 정의가 필요한 실정이다. 정적토압의 작용점은 H/3, 동적토압의 작용점은 0.6H 로 각 분력의 조합을 이용하여 지진 시 토압 작용점을 구하고 있다. 한편, 지진 시 옹벽의 활동, 지지력, 전도 및 전체 파괴등에 대한 안정해석을 수행하도록 하고 있으나 자세한 내용은 언급하지 않았다.

도로교설계기준[3]에서는 지진 시 옹벽이 아닌 교대에 작용하는 동적토압에 대하여 포함하고 있다. 독립식 교대에 대해서는 구조물기초설계기준과 같이 M-O 방법을 이용하여 등가정적하중을 평가하고 교축방향으로 작은 변위를 허용하는 조건에 대해 k_h 를 50% 감하여 사용하고 예상할 수 있는 변위의 상한선을 $250 \cdot a_{max}(mm)$ 로 제한하였다. 변위를 구속하는 교대에 대해서는 k_h 를 50% 증가시켜 사용하도록 하면서 변위에 따라 경제적인 설계가 가능하도록 하였다. 한편, 토압의 작용점은 M-O 방법으로부터 평가된 지진 시 전체 토압을 균등분포로 보고 교대 높이의 H/2 지점에 작용하는 것으로 가정하였다. 안정해석 시에는 지진 시 발생하는 교대 자중에 의한 관성력의 영향을 언급하면서 중력식 지지벽에 대하여 자중에 의한 관성력을 고려하도록 설명하고 있다.

2.2.2 도로옹벽표준도

국토해양부에서 제공하는 도로옹벽표준도[2]는 도로교설계기준[3] 및 구조물 기초설계기준[4]을 바탕으로 작성되었다. 동적토압과 관련하여 다소 상이한 두 기준을 바탕으로 작성되었기 때문에 동적토압의 분포 및 벽체의 관성력에 대하여 모호한 부분이 존재한다. 역T형 옹벽 T-7 모델을 기준으로 표준도의 계산과정을 검토한 결과 동적 토압의 크기는 M-O 방법을 이용하여 계산한 후, 안정해석 시에는 지진 시 전체 토압의 분포는 균등분포로 가정하여 작용점을 H/2 로 사용하고 있으며 단면력 산정시에는 토압의 크기는 삼각형 형태로 산정하지만 작용점은 일괄적으로 H/2 로 다소 높게 계산하고 있다(Fig. 1). 벽체의 관성력에 대해서는 옹벽의 자중 관성력을 안정해석과 단면력 평가시 모두 포함하고 있어 중력식 옹벽 뿐만 아니라 역T형 옹벽에서도 옹벽의 관성력을 고려하고 있다. 다만, 설계지진계수를 수평 진도 2등급 0.11 g를 기준으로 $k_h=0.11/2=0.055 g$ 로 설계하였기 때문에, 자칫 지반증폭특성이 고려되지 않은 암반 노두값을 k_h 값으로 사용하는 것처럼 오해의 소지가 존재한다.

2.3 국외

2.3.1 AASHTO

AASHTO 2012[11]에서는 최근의 연구를 바탕으로 경제적인 설계방향으로 개선되어 있다. k_h 는 지반증폭특성이 고려된 자유장 최대가속도를 사용하도록 하고 있으며 지반등급에 따라 값을 보정하도록 한다. 25~50 mm (1~2 inch) 의 변위를 허용할 때에는 k_h 를 50%감하여 사용하도록 하였으며 높이 18 m (60ft) 이상의 옹벽에 대해서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석을 수행하도록 하고 있다. 지진 시 발생하는 전체 토압의 분포를 삼각형 형태로 규정하여 Fig. 2 와 같이 정적토압과 동적토압의 작용점을

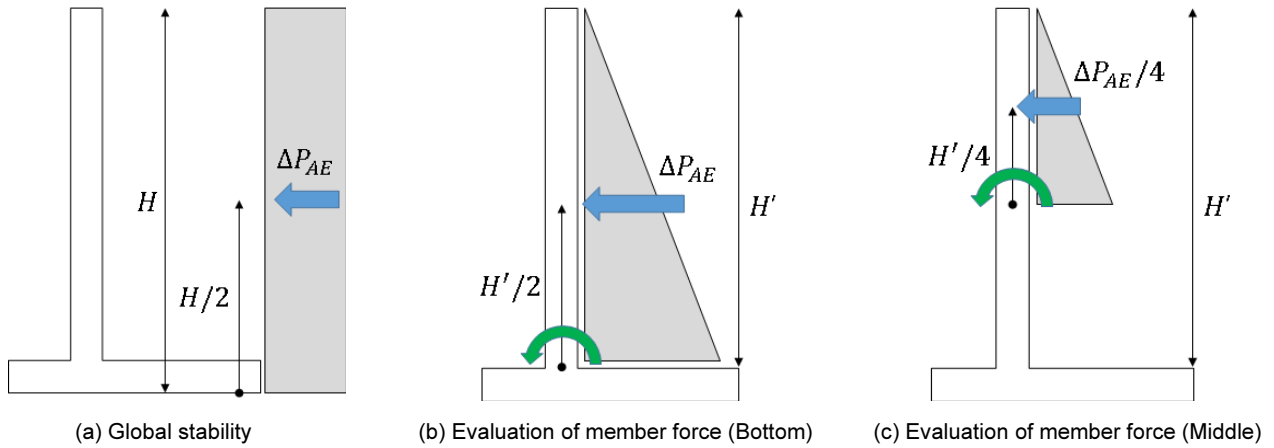


Fig. 1. Seismic design concept according to standard drawing (Model T-7) [2]

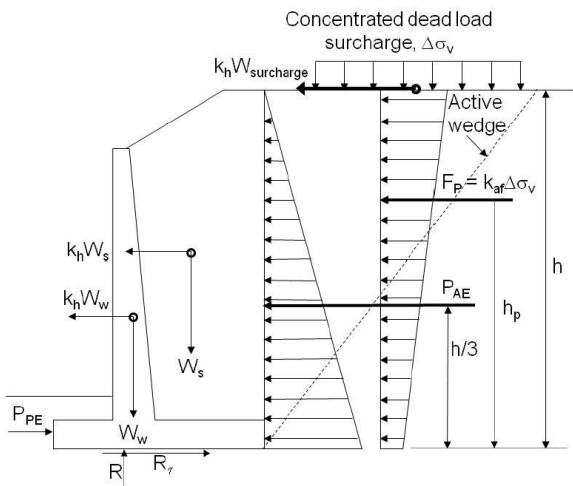


Fig. 2. Seismic force diagram for gravity wall external stability evaluation [11]

H/3 으로 명확하게 규정하고 있다. 이는 기존에 Seed and Whitman [9] 이 제안한 동적토압 작용점 0.6H 와는 상반되는 내용이며 최근 연구 결과를 바탕으로 내진설계를 좀 더 경제적으로 이끌고 있다. 한편, 옹벽의 자중 (W_w)에 의한 관성력($P_{IR}=k_h \cdot W_w$) 또한 안정해석 및 부재력 검토에 포함하도록 하였으며 다음과 같은 하중조합을 모두 검토하도록 하고 있다.

조합 1 : $P_{AE} + 0.5P_{IR}$

조합 2 : $0.5P_{AE} + P_{IR}$ (단, $0.5P_{AE}$ 가 정적 토압을 초과해야 함)

여기서 P_{AE} 는 지진시 발생하는 전체(정적+동적) 토력의 크기이다.

2.3.2 EUROCODE

Eurocode8 Part 5[12]는 옹벽의 변위 허용 기준을 $300k_h$ (mm), $200k_h$ 및 고정조건으로 다양화하면서 k_h 의 크기를 지표면 자유장 최대가속도의 50%, 66%, 100% 로 각각 보정하여 사용하고 있다. 동적토압의 작용점을 0.5H 로 가정하여 Seed and Whitman [9] 이 가정한 0.6H 보다는 다소 경

제적으로 규정하고 있다. 10m 이상 옹벽에 대해서는 k_h 산정을 위한 1차원 해석을 권장하고 있으며 옹벽 자중에 의한 관성력 영향은 따로 언급을 하지 않았다. AASHTO[11] 에 비해 Eurocode8 Part 5[12] 는 2004년 이후 개정되지 않았기 때문에 최근 연구 동향을 반영하지 못하고 있다.

3. 국내의 연구동향

Table 1 에 옹벽의 내진설계 관련하여 국내의 설계기준의 등가정적해석에 대한 내용을 정리하였다. 기준 간 차이가 나는 부분은 지진 시 토압의 분포와 벽체 관성력 포함 여부, 설계지진가속도 k_h 의 산정 방법이다. 이와 관련하여 최근까지 국내외 연구자들의 활발한 연구가 진행되고 있고 AASHTO[11] 에는 이들의 연구 결과가 반영되면서 안전하고 경제적인 내진설계 방향을 제시하고 있다.

Nakamura[13] 는 건조사질토 지반의 중력식 옹벽에 대하여 M-O 방법의 가정 사항이 실제 지진 시 거동과는 상이함을 원심모형실험을 이용하여 분석하였다. 지진 시 뒤채움 지반이 강체거동을 보이지 않음으로써 파괴 흩꺼기에 동일한 가속도가 적용되지 않고(Fig. 3), 이로 인하여 동적토압이 벽체 높이에 따라 변함을 직접 계측하였다. 또한, 벽체와 뒤채움 지반간의 위상차이(Fig. 4)로 인하여 토압의 감소현상이 발생함을 보였으며 지진파에 따라 토압의 분포가 달라질 수 있음을 평가하였다. Al Atik and Sitar[14] 는 건조사질토 지반의 U자형 옹벽에 대하여 동적원심모형실험을 수행하였는데 동적토압의 분포는 삼각형에 가까우며 작용점 또한 Seed and Whitman[9]이 제안한 0.6H 보다는 H/3 에 가깝다고 평가하였다(Fig. 5). 또한, 뒤채움 지반과 옹벽간의 위상차로 인하여 M-O 방법이 동적토압을 과다 평가할 수 있음을 지적하였으며 옹벽 벽체의 관성력 또한 동적토압의 발현에 상당한 영향을 끼침을 평가하였다(Fig. 6). Sitar et al.[15]는 건조사질토를 이용하여 캔틸레버 형식의 역T형 옹벽에 대하여 동적토압을 평가한 결과 삼각형 분포를 보이며 그 크기 또한 M-O 방법보다 현저히 작음을 원심모형실험을 이용하여 보여주었다(Fig. 7). 또한, 국내에서도 Jo et al.[16]에 의하여 5.4m, 10.8m 역T형 옹벽의 동적토압 및 관성력 영향이 동적원심모형실험을 통하여 평가된 바 있다. 이 역시 동적토압의 분포는 역삼각형 보다는 삼각형 형태에 가까우며 옹벽과 뒷채움재의 위상차로 인하

Table 1. Comparison between seismic design codes for retaining wall

Code	Method	Point of application for earth pressure * (from bottom)	Wall inertia	seismic coefficient, k_h
Korean Highway Bridge Design Code[3]	M-O	0.5H for (S+D)	O	1) k_h =Free-Field PGA 2) k_h =0.5PGA (250·khmm disp. allow)
Korean Structure Foundation Design Code[4]	M-O	1/3H for (S) 0.6H for (D)	- **	k_h =Free-Field PGA
Korean Standard drawing of railroad retaining wall[2]	M-O	0.5H for (S+D, for global stability) 1/3H for (S+D, for member force)	O	k_h =0.11g/2=0.055g (disp. allow, Level 2)
AASHTO[11]	M-O	1/3H for (S+D)	O	1) k_h =Free-Field PGA (no disp. allow) 2) k_h =0.5PGA (25~50mm disp. allow)
EUROCODE8-5[12]	M-O	1/3H for (S) 0.5H for (D)	-	1) k_h =Free-Field PGA (no disp. allow) 2) k_h =0.5, 0.66PGA (300 k_h , 200 k_h mm disp. allow)

S : static earth pressure, D : dynamic earth pressure, S+D : static+dynamic *, - : no comment **

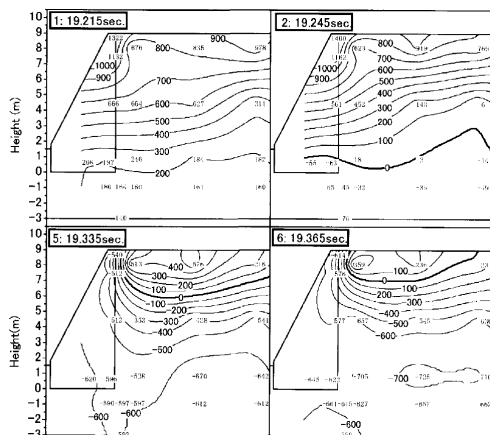


Fig. 3. Acceleration distribution in Backfill [13]

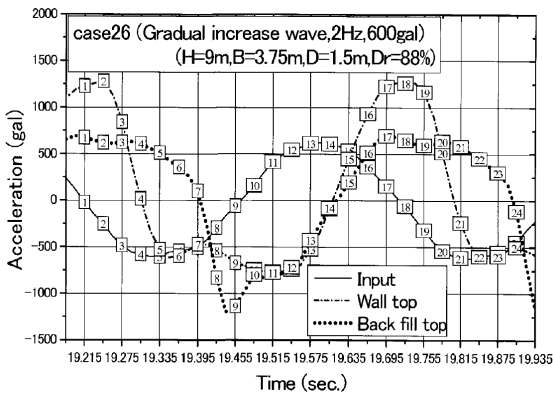


Fig. 4. Phase difference of Input, backfill and wall [13]

여 지진시 토압이 작용하지 않을 때에도 벽체의 관성력 만으로도 구조적으로 상당한 모멘트가 발생함을 실험적으로 보고하였다(Fig. 8).

지금까지 소개된 연구사례들은 대부분 옹벽이 설치되는 하부 기초지반을 함께 모사하여 실험을 수행하였으며 하부 기초지반의 침하가 옹벽의 변위형상에 영향을 미칠 수 있고 이에 따른 옹벽의 회전 변위는 지진 시 동적 토압이 주동이 아닌 수동상태로 변화될 수 있는 가능성을 갖고 있다. 이와 같은 한계점을 해결하기 위해 본 연구진은 건조사질토를 이용하여 옹벽의 바닥면

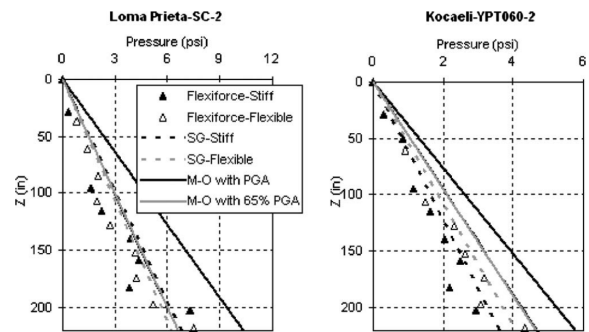


Fig. 5. Distribution of dynamic earth pressure for U-shape retaining wall [14]

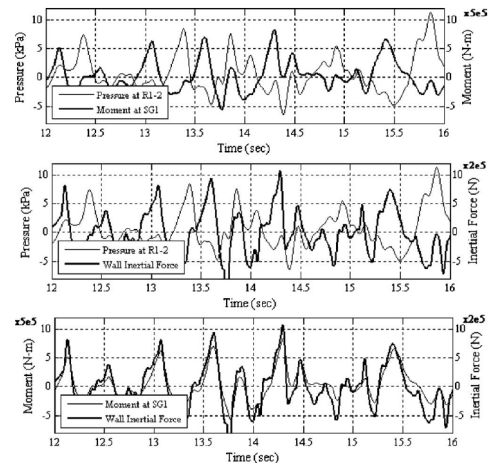


Fig. 6. Comparison between dynamic earth pressure and wall inertia [14]

을 고정시킨 후, 벽체의 강성을 변화시키며 동적토압의 분포 및 크기에 대하여 원심모형실험을 수행하였다[17]. 옹벽의 강성은 두께 0.224 m, 0.561 m, 1.262m 철근콘크리트($E=25$ MPa) 역T형 옹벽을 대상으로 수행되었으며 강성 변화에 따른 토압의 분포, 작용점 및 크기에 대하여 벽체에서 최대 휨모멘트가 발생할 때의 토압을 직접 계측하였다. 그 결과 동적토압의 분포는 벽체 강성과 상관없이 역삼각형 형태보다는 삼각형 형태에 가까우며 벽체 강

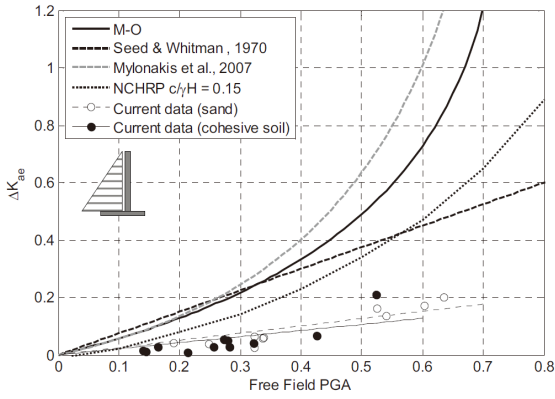
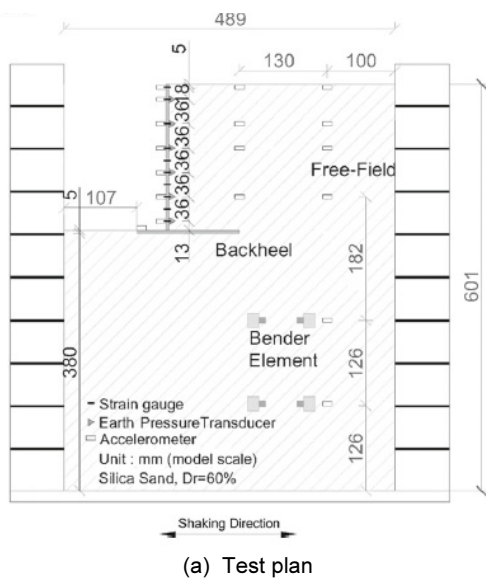
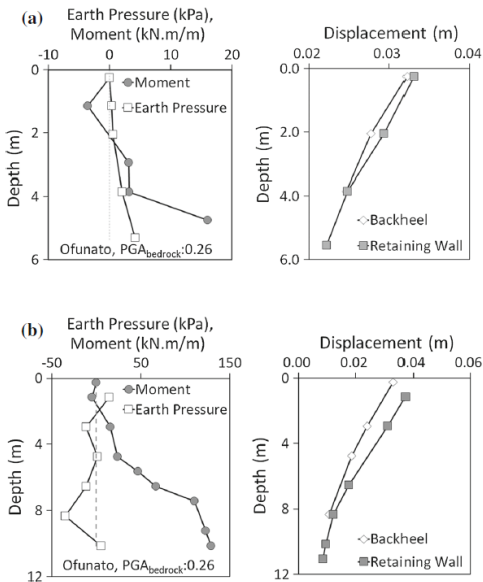


Fig. 7. Comparison between M-O and measured dynamic earth pressure for inverted T-shape retaining wall [15]



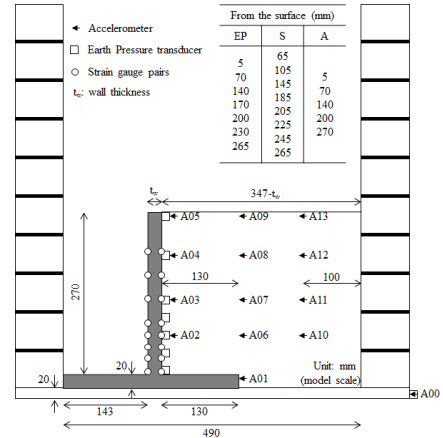
(a) Test plan



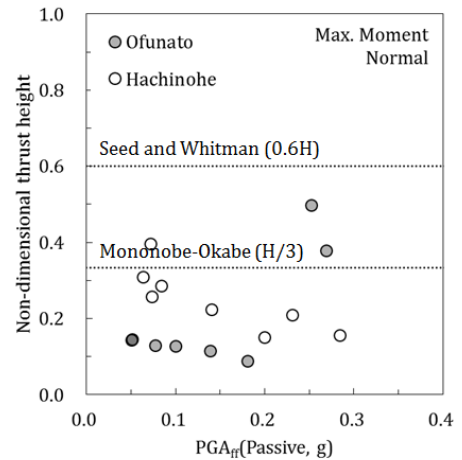
(b) Distribution of dynamic earth pressure and displacement when the maximum moment was occurred at the bottom of stem

Fig. 8. Centrifuge test results for flexible retaining wall [16]

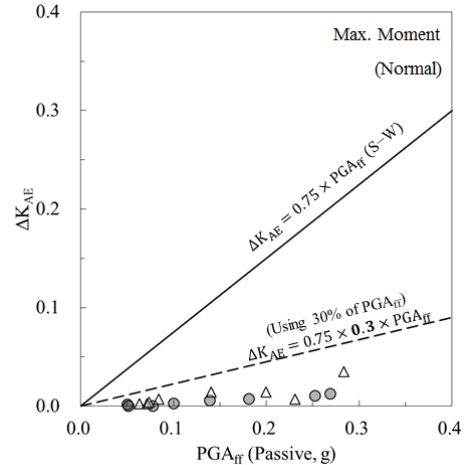
성이 증가할수록 토압의 크기 및 작용점 높이가 증가하는 경향이 확인되었다. 하지만 일반적인 옹벽 두께 0.561 m를 기준으로 토압의 크기는 Seed and Whitman [9] 이 제안한 방법을 기준으로 최대 30%의 토압크기가 측정되었으며, 작용점은 0.5H 보다 낮은 것으로 확인되어 역삼각형 토압 및 현행 설계기준이 동적토압 영향을 과대평가 할 수 있음을 제시하였다(Fig. 9).



(a) Test plan



(b) Application of dynamic earth pressure for fixed wall



(c) Comparison S-W and measured coefficient of dynamic earth pressure

Fig. 9. Research on effect of flexibility on dynamic earth pressure [17]

옹벽의 내진설계 시 M-O 방법은 전 세계적으로 사용하고 있는 대표적인 유사정적 방법으로 이를 이용하기 위해서는 설계지진계수(k_h), 토압의 크기 및 분포에 대한 명확한 정의가 필요하며 안정 해석 시 옹벽의 관성력 또한 영향을 있음을 많은 연구사례에서 확인할 수 있었다. 지진 시 옹벽에 작용하는 동적토압의 분석은 지반-구조물 상호작용에 대하여 수치해석 모델이 이를 완벽히 묘사하기 어렵다는 단점이 있어 현재 원심모형실험을 이용하여 전 세계적으로 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며 AASHTO [11]에서는 Nakamura [13], Al Atik and Sitar [14] 의 연구 결과를 반영하여 경제적인 설계를 유도하고 있다. 국내에서도 국내 내진관련 연구진들의 활발한 연구 결과를 바탕으로 경제적 내진설계기준 개정이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구진은 경제적인 내진설계를 위하여 앞서 언급한 요소들과 관련하여 국내 내진설계기준이 개선되어야 할 방향을 제시하고 분석해 보았다.

4. 내진설계기준 개선방향

우리나라 옹벽의 내진설계 및 동적토압 산정과 관련하여 내진선진국의 최신 연구동향 및 내진설계기준을 고려하여 다음과 같이 개선이 필요한 내진설계기준 방향을 제시하였다.

- 변위허용 및 높이에 따른 설계지진계수 (k_h) 보정
 - 변위 허용에 따라 최대 50% 까지 감하여 사용 가능
 - 지반종류 뿐만 아니라 옹벽의 중요도 및 높이에 따른 지반응답해석 권고
- 동적토압 분포 및 작용점
 - 동적토압 분포는 정적토압과 동일한 삼각형 형태로 간주
 - 지진 시 외적안정 평가에 정적+동적 토압의 작용점은 H/3 로 평가
- 옹벽 구조물의 관성력 고려
 - 지진 시 외적안정 평가에 옹벽 구조물의 자중 관성력을 포함

그렇지만 이 외에도 NCHRP Report 611 [18] 에 따르면 설계지진계수 (k_h) 산정 시 지반의 증폭특성 및 뒤채움 지반의 위치별 가속도 분산에 따른 유효설계지진계수(effective k_h)의 필요성이 대두되고 있다. 또한 순간적으로 큰 토압을 받는 동적토압에 대하여 이를 정적으로 적용하고 있는 유사 정적 방법의 신뢰성에 대하여 논란의 여지가 계속되고 있다. 따라서, 이에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 우리나라에 맞는 경제적이고 안전한 옹

벽의 내진설계기준을 정립할 필요가 있다.

5. 설계기준 상이에 따른 문제점 검토

위와 같이 국내의 설계기준과 연구 결과를 검토한 결과 옹벽의 내진설계에서 M-O 방법과 같은 유사정적 해석을 수행 시 가장 중요한 요소는 1) 설계지진가속도(k_h), 2) 동적토압의 분포, 3) 옹벽 자중에 의한 관성력 임을 알 수 있으며 설계기준별 다소 상이한 내용으로 현업에 혼란을 주고 있음을 알 수 있다. 이러한 설계기준의 차이가 옹벽 구조물의 지진시 외적안정 및 부재력에 미치는 영향을 파악하기 위해 도로옹벽표준도 [2]에 제시된 역T형 옹벽 T-7 예제를 대상으로 내진설계를 수행하였다. 해석대상 옹벽의 형상과 제원은 Fig. 10, Table 2 와 같으며 평가순서는 도로옹벽표준도 [2]에 명시된 방법을 적용하였다. 옹벽이 국내 지진구역 I의 S_C, S_D 지반에 위치함을 가정하고 1000년 주기 지진에 대하여 0.154 g 의 지진가속도가 보통암 노두에 작용하여 설계지진가속도(k_h)는 0.182 g, 0.224g 로 입력하였다. k_h , 동적토압 분포의 조합에 따라 평가한 예제의 경우는 Table 3과 같으며 각 경우에 대해서 옹벽 자중에 의한 관성력 포함 여부에 따른 결과를 함께 분석하였다.

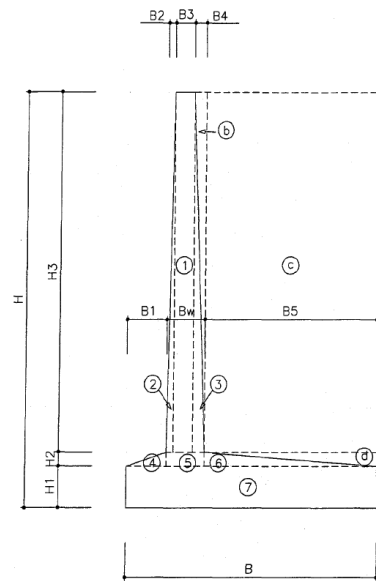


Fig. 10. Example model (T-7) [2]

Table 2. Retaining wall Details for T-7 [2]

Width (m)						
B1	B2	B3	B4	B5	B	Bw
0.600	0.108	0.300	0.192	2.600	3.800	0.600
Height (m)						
H1	H2	H3	H	H0		
0.600	0.000	5.400	6.000	0.000		
Properties of soil						
γ (retaining soil)	ϕ (retaining soil)	γ (foundation soil)	ϕ (foundation soil)	seismic design level		
19.00 (kN/m ³)	30.00°	20.00 (kN/m ³)	35.00°	class 2		

Table 3. Category for case study

Case	k_h	Distribution of dynamic earth pressure
I Structure Foundation Design Code[4]	Free-Field PGA	H/3 (S) + 0.6H (D)
II Modified Case I (Triangle Distribution)	Free-Field PGA	H/3 (S+D)
III Korean Highway Bridge Design Code[3]	Free-Field PGA/2	H/2 (S+D)
IV AASHTO[11]; Suggestion by authors	Free-Field PGA/2	H/3 (S+D)

Table 4. Results of external stability check according to procedure of Standard drawing of railroad retaining wall[2]

(a) Free-Field PGA = 0.182g (Site class= S_C)

Case	wall inertia	Sliding	Overturning	e (B/3=1.267m)	Bearing
I Structure Foundation Design Code[4]	include	N.G(0.859)	N.G(1.430)	<B/3, 1.258m	OK(1.734)
	exclude	N.G(0.947)	OK(1.523)	<B/3, 1.167m	OK(1.979)
II Modified Case I (Triangle Distribution)	include	N.G(0.859)	OK(1.619)	<B/3, 1.084m	OK(2.205)
	exclude	N.G(0.947)	OK(1.739)	<B/3, 0.993m	OK(2.450)
III Korean Highway Bridge Design Code[3]	include	N.G(1.159)	OK(1.666)	<B/3, 1.047m	OK(2.305)
	exclude	OK(1.235)	OK(1.727)	<B/3, 1.001m	OK(2.427)
IV AASHTO[11]	include	N.G(1.159)	OK(2.270)	<B/3, 0.706m	OK(3.225)
	exclude	OK(1.235)	OK(2.384)	<B/3, 0.661m	OK(3.347)

(b) Free-Field PGA = 0.224g (Site class= S_D)

Case	wall inertia	Sliding	Overturning	e (B/3=1.267m)	Bearing
I Structure Foundation Design Code[4]	include	N.G(0.763)	N.G(1.237)	>B/3, 1.491m	OK(1.105)
	exclude	N.G(0.849)	N.G(1.323)	>B/3, 1.379m	OK(1.406)
II Modified Case I (Triangle Distribution)	include	N.G(0.763)	N.G(1.422)	<B/3, 1.266m	OK(1.712)
	exclude	N.G(0.849)	OK(1.537)	<B/3, 1.155m	OK(2.013)
III Korean Highway Bridge Design Code[3]	include	N.G(1.075)	OK(1.548)	<B/3, 1.145m	OK(2.040)
	exclude	N.G(1.157)	OK(1.613)	<B/3, 1.089m	OK(2.191)
IV AASHTO[11]	include	N.G(1.075)	OK(2.081)	<B/3, 0.791m	OK(2.995)
	exclude	N.G(1.157)	OK(2.201)	<B/3, 0.736m	OK(3.145)

(): 안전율

지진 시 외적안정평가에 관하여 4가지 경우의 해석 결과는 Table 4와 같다. Case I, Case III, Case IV 는 각각 국내의 내진설계기준에 해당하는 조건이며 토압 분포의 변화에 따른 영향을 파악하기 위하여 Case I 과 Case II 의 결과를 비교하였다. 우선 평가를 수행한 T-7 예제는 활동방지 key 가 설치되어 있지 않기 때문에 1000년 지진에 대해서는 대부분 활동에 대하여 지진 시 안전율 1.2에 미치지 못함을 알 수 있다. 활동에 대해서는 설계지진 계수 k_h 와 옹벽 자중 관성력만 영향을 미치고 있으며 S_C 지반에 대해서는 관성력을 미포함하는 경우 활동에 대해서도 안전한 것으로 판단하고 있다.

지진 시 옹벽의 전도는 설계지진계수 k_h 와 옹벽 자중 관성력 뿐만 아니라 동적토압의 분포에도 영향을 받는다. 전도 안전율 1.5에 대하여 S_C 지반에 대해서는 Case I 을 제외한 모든 경우에 안전한 것으로 판정되었으며 Case II 에서는 동적토압의 작용점이 H/3 으로 낮아지면서 활동 모멘트가 감소하였기에 전도에 대해서 안전한 것으로 평가되었다. S_D 지반의 경우 k_h 를 감하여 사용하지 않은 Case I, II에서 전도에 불안정한 것으로 평가되었다. 동적토압의 분포를 역삼각형으로 가정할 때, 즉 동적토압의 작용점을 정적토압의 경우와 달리 0.6H 로 높게 산정할 경우는 지진 시 동적토압에 의한 전도 모멘트가 과대평가되고, 동적토압의 크기가 증가할수록 작용점에 따른 과대평가 영향이 증가한다.

옹벽자중의 관성력에 대해서는 k_h 를 감하여 사용하는 경우 활동에 대하여 상이하게 판단하는 경우가 S_C 지반의 Case III 와 Case IV에서 나타났다. 중력식 옹벽과 달리 벽체의 자중이 비교적 가벼운 역T형 옹벽에서는 지

진의 크기가 작을 때에 옹벽 자중의 관성력이 미치는 영향이 크기 때문에 우리나라와 같이 강한 지진보다 약한 지진이 발생하는 경우에 더욱 중요한 요소임을 알 수 있다. 그 밖에도 S_C 지반의 Case I, S_D 지반의 Case II 에 대해서도 옹벽 자중의 관성력 포함 여부에 따라 전도 모멘트 값에 영향을 주기 때문에 전도에 대해서 상이하게 판정하고 있음을 알 수 있다.

동적 토압의 작용점 변화에 따라 옹벽 벽체에서의 부재력 변화를 살펴본다. 현재 도로옹벽표준도에서는 부재력 검토시 토압의 크기는 삼각형 형태의 분포를 사용하고 있으나 작용점은 H/3가 아닌 H/2를 사용하고 있어 다소 모순적인 내용을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 토압의 분포를 삼각형으로 계산할 때에는 동적 토압의 작용점을 H/3 으로, 토압의 분포를 역삼각형으로 계산할 때에는 동적 토압의 작용점을 0.6H 로 간주하여 옹벽 벽체의 하단과 중앙부에서 단면력을 평가하였다. 단면력 집계를 위한 하중 조합은 도로옹벽표준도(2008)에서 제시한 지진시 계수하중 (횡토압, H : 1.6, 지진력, E = 1.0, 상재하중, L = 0.0) 을 사용하였으며 그 외의 과정은 동일하게 수행하였다. k_h 의 값은 외적안정시 사용했던 S_C, S_D 지반의 지표면 PGA 값을 가감없이 그대로 이용했으며 결과는 Table 5와 같다.

벽체하단에서의 전단력은 토압의 분포와 상관없이 M-O 방법으로 평가된 동적 토압의 크기에만 영향을 받지만 모멘트의 경우 분포에 따른 작용점 높이가 달라지면서 벽체하단에 발생하는 모멘트 크기에 영향을 받는다. 벽체 하단 및 중앙부의 모멘트 크기는 삼각형 분포와 작용점 H/3 에 비해 도로 옹벽표준도의 결과가 S_C 지반에서 약 10%, S_D 지반에서 약 12% 과대평가

Table 5. Results of section force check according to procedure of Standard drawing of railroad retaining wall[2]

(a) Free-Field PGA = 0.182g (Site class=S_C)

		Dynamic earth pressure: Triangle Application point: 0.5H	Dynamic earth pressure: Triangle Application point: H/3 <Effective Case, AASHTO[11]>	Dynamic earth pressure: Inverted Triangle Application point: 0.6H
Bottom	Shear force(kN/m)	194.021 (00.00%)	194.021	194.021 (00.00%)
	Moment(kN·m)	394.747 (10.97%)	355.739	418.151 (17.54%)
Middle	Shear force(kN/m)	050.504 (00.00%)	050.504	072.174 (42.91%)
	Moment(kN·m)	051.955 (10.36%)	047.079	089.987 (91.14%)

(b) Free-Field PGA = 0.224g (Site class=S_D)

		Dynamic earth pressure: Triangle Application point: 0.5H	Dynamic earth pressure: Triangle Application point: H/3 <Effective Case, AASHTO[11]>	Dynamic earth pressure: Inverted Triangle Application point: 0.6H
Bottom	Shear force(kN/m)	206.514 (00.00%)	206.514	206.514 (000.00%)
	Moment(kN·m)	427.728 (12.64%)	379.727	456.528 (020.23%)
Middle	Shear force(kN/m)	054.088 (00.00%)	54.088	080.755 (049.30%)
	Moment(kN·m)	056.680 (11.84%)	50.680	103.481 (104.19%)

† () : increase or decrease percentage in comparison with <Effective Case, AASHTO>

하고 있다. Seed and Whitman (1970) 이 제안한 역삼각형 형태의 토압을 적용할 경우에는 토압 분포의 영향으로 벽체하단보다 벽체 중앙에서의 토압 분포별 차이가 증가하며 전단력에서는 약 40% 이상, 모멘트는 약 100%의 과대평가 가능성을 보이고 있다. 이처럼 토압의 분포에 따라 단면력 평가에서 큰 차이를 보이고 있으며, 특히 벽체 중앙에서의 값에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 지진 시 작용하는 동적토압의 분포를 설계기준에서 명확히 제시해 줄 필요가 있으며 내진선진국의 설계기준 및 최근연구의 결과에 발맞추어 동적토압의 분포를 삼각형 형태로 통일시킬 필요가 있다. 그에 따라 도로옹벽표준도의 계산과정에서도 동적토압의 분포에 대하여 일관성 있는 적용이 필요하다.

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 옹벽 구조물 내진설계시 사용하는 설계요소들에 대해서 내진설계기준 현황 및 국내외 연구동향에 대해 분석하고 현행설계기준의 적정성 검토를 수행하였다. 이를 바탕으로 설계지진계수(k_h) 보정필요성, 동적토압의 분포 및 작용점, 옹벽 구조물의 관성력 고려에 대한 개선방향을 제시하였으며 이들이 지진 시 옹벽의 외적 안정에 미치는 영향, 동적토압의 분포가 옹벽 벽체의 부재력에 미치는 영향을 도로옹벽표준도(2008)의 예제해석을 통해 파악하였으며, 이에 대한 개선방향을 제시하였다.

옹벽 관련 내진설계기준의 선진화를 위해서는 우선적으로 이에 대해 국내에 적합한 한국형 내진설계기술개발을 위한 연구가 수행되어야 하며 각 구조물을 소관하는 유관부처간의 긴밀한 협의가 필요하다. 추후 설계기준 개정 시 타 협회의 설계기준과 모순되는 점에 대해 명확히 인지한 후 이에 대한 명확한 연구 결과 및 관리가 필요할 것으로 사료된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토해양부 건설기술혁신사업(11기술혁신 D02 : 동적원심 모형실험을 이용한 기초-지반 시스템 및 토류구조물 지진하중 평가) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

/ REFERENCES /

1. Seo HY, Park KS, Kim IH, Kim DS. A discussion on the improvement of seismic design criteria of infrastructures. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2014;18(5):231-240.
2. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs. Standard drawing of railroad retaining wall. c2008.
3. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs. Korean Bridge Design Code. Korea Road & Transportation Association. c2010.
4. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs. Structure Foundation Design Code. Korea Geotechnical Society. c2008.
5. Ministry of Oceans and Fisheries. Ports and Fishing Harbors Design Code. Korea Ports & Harbours Association. c2014.
6. Ministry of Construction and Transportation. Research of Seismic Design Criteria (II). Earthquake Engineering Society of Korea. c1997.
7. Okabe S. General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers. 1926;12(1):123-134.
8. Mononobe N and Matsuo H. On the Determination of Earth Pressure During Earthquakes. Proceedings, World Engineering Conference. 1929;9:179-187.

9. Seed HB and Whitman RV. Design of earth retaining structures for dynamic loads. Proceedings of ASCE Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures: Cornell Univ., Ithaca, N.Y., 1970 Jun;103-147.
10. Lee JS. Dynamic Bearing Pressure of Inverted T-type Retaining Walls Subjected to Seismic Motion. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2012;16(2):35-45.
11. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Load and Resistance Factor Design Bridge Design Specifications. 6th Edition. c2012.
12. Comité Européen de Normalisation. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 5: Foundations, Retaining Structures, Geotechnical Aspects. CEN, Brussels. c2004.
13. Nakamura S. Reexamination of Mononobe-Okabe theory of gravity retaining walls using centrifuge model tests. Soils and foundations. 2006;46(2):135-146.
14. Al Atik L, and Sitar N. Seismic earth pressures on cantilever retaining structures. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2010;136(10):1324-1333.
15. Sitar N, Mikola RG, Candia G. Seismically induced lateral earth pressures on retaining structures and basement walls. Geotechnical Engineering State of the Art and Practice:Keynote Lectures from GeoCongress 2012. 2012:335-358.
16. Jo SB, Ha JG, Yoo MT, Choo YW, Kim DS. Seismic behavior of an inverted T-shape flexible retaining wall via dynamic centrifuge tests. Bulletin of earthquake engineering. 2014;12(2):961-980.
17. Jo SB, Ha JG, Kim DS. Effect of wall flexibility on the seismic behaviour of cantilevered retaining wall, submitted to Géotechnique.
18. Anderson DG, Martin GR, Lam IP, and Wang JN. Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Slopes and Embankments, and Buried Structures, NCHRP Report 611. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. c2008.