

수처리 지중구조물의 내진설계 기준 개선을 위한 지진 응답 제안식의 관한 연구

A Study on the Seismic Response Formula for Improvement of Seismic Design Code of Water Treatment Underground Structures

이정배^{1*}, 배상수², 정광모³, 방명석⁴

Joung-Bae Lee^{1*}, Sang-Soo Bae², Kwang-Mo Chung³, Myung-Seok Bang⁴

¹Member, Graduate Student, Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation (KECC, Korea Engineering Consultants Corp.), 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16106, Republic of Korea

²Member, Graduate Student, Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation (KECC, Korea Engineering Consultants Corp.), 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16106, Republic of Korea

³Non-Member, Research Fellow, Dept. of Water Supply & Sewerage Engineering, Korea Engineering Consultant Corporation, 21 Sangil-ro-6-gil, Gangdong-gu, Seoul 05288, Republic of Korea

⁴Non-Member, Professor, Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16106, Republic of Korea

ABSTRACT

Generally it was known that member forces in the earthquake resistant design is lower than those in the general design. But it is not true in cases of water treatment underground structures, which is different in each case like water treatment plant, sedimentation basin, and utility-pipe conduit. Also, looking at the scale of earthquakes that have recently occurred in Korea, large-scale earthquakes are frequent, so when the magnitude of the design seismic force increases, it is necessary to investigate the seismic behavior of the water treatment underground structure and to deal with it. In this study the change rate of member forces was investigated by the change of design load factor (earthquake acceleration design criteria), earth depth, underground water level. The pseudo-static analysis and response displacement method was applied, and various analyzes were conducted depending on the ground water and soil depth. The proposed formula in this study will be efficient when the earthquake design code of water treatment underground structures is revised.

요 지

수처리 지중구조물의 내진설계에서 내진설계 시보다 일반설계의 경우에 부재력 값이 더 크다고 알려져 있다. 그러나 이는 수처리 지중구조물의 종류 즉, 정수지 구조물, 침전지 구조물, 공동구 구조물에 따라서 다르다. 또한 최근 국내에서 발생한 지진의 규모를 보면 대형지진이 빈번하므로 설계지진력의 크기가 커질 때 수처리 지중구조물의 내진거동의 규명 및 대처방안이 필요하다. 본 연구에서는 수처리 지중구조물의 종류별로 하중계수 즉, 설계지진가속도를 일정 비율로 증가시키면서 지중구조물의 지진응답을 분석하고 변화를 나타내는 식을 제안하여 향후 설계기준 개정시에 참조하도록 하였다. 해석은 등가 정적해석법과 응답 변위해석법을 적용하고, 지하수 유무, 토피고에 따라서 다양하게 분석하였다. 본 연구에서 제안된 식은 향후 수처리 지중구조물의 설계기준 개정시에 유용할 것으로 판단된다.

Keywords : Underground water structures, Acceleration coefficients, Load factor, Seismic analysis methods, Seismic code revision, Pseudo-static analysis, Response displacement method

Received 28 Apr. 2022, Revised 26 Jun. 2022, Accepted 9 Sep. 2022

*Corresponding author

Tel: +82-2-2049-5443; Fax: +82-2-2049-5117

E-mail address: bigcats@hanmail.net (J.-B. Lee)

1. 서론

과거 연구에 의하면 수처리 지중구조물에 대해 국내의 내진설계 기준에 따라 내진해석을 수행할 경우, 대부분 지진시보다 평상시의 단면력이 지배되어 지진의 영향이 미비한 것으로 평가되었다.(Chung, 2013) 그러나 최근 들어 한반도 주변을 중심으로 발생하는 대지진과 국내의 지진 발생횟수를 분석하면, 우리나라도 지난 2백여 년간 지진을 유발할 에너지를 축적해 왔을 가능성이 크며, 만일 지진이 발생한다면 규모 7.0을 넘는 대형지진을 배제할 수 없다는 가능성을 조심스럽게 예측하고 있다.(Ministry of Environment, 1999) 따라서, 수처리 지중구조물은 시민생활과 도시기능 유지에 기본적인 중요한 시설로 지금까지 발생한 지진에 대해 안전하나 앞으로 대형지진 발생 시 큰 피해가 예상되어, 향후 불확실한 지진에 대응 가능한 개선된 내진설계기준에 대한 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 이러한 요구에 맞춰 우리나라 실정에 적합한 내진설

계 기준 개선을 위한 자료를 제공하고자, 현재 적용되고 있는 국내 내진설계 기준에 따라 지진 크기를 결정하는 설계가속도와 하중증가계수를 변수로 평상시와 지진시로 나누어 단면력 산정을 위해 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과는 회귀분석을 통해 지진 크기와 단면력과의 상관관계식을 제안하였다.

2. 국내외 수처리 지하시설물의 내진설계 기준 비교

우리나라 지하구조물에 대한 지진해석방법 및 내진설계 기준이 도입될 때, 대부분 일본의 지하구조물 내진설계 기준을 적용 또는 준용하였다. 따라서 지진 응답 제안 식의 도출을 위해 Table 1(Ministry of Environment, 2009)과 같이, 우리나라와 일본의 기준을 1대1로 비교하였고 이를 참조하였다.

Table 1. Seismic design codes for domestic and foreign underground water structures (Ministry of Environment, 2009)

Division	Republic of Korea		Japan	
Seismic grade	serviceability limit state	collapse prevention level	serviceability limit state (Level 1)	final limit state (Level 2)
Analysis method	response displacement method / Time-Step Analysis Method		response displacement method / Time-Step Analysis Method	
Ground displacement	$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T \cdot \cos \frac{\pi x}{2H}$ <ul style="list-style-type: none"> · S_v : response velocity spectrum · T : natural period of surface ground · H : surface ground thickness 		$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T \cdot K_H' \cdot \cos \frac{\pi x}{2H}$ <ul style="list-style-type: none"> · S_v : response velocity spectrum · T : natural period of surface ground · H : surface ground thickness 	
Ground division	SA, SB, SC, SD, SE, SF		I, II, III	
Seismic base	SB (shear wave velocity ≥ 760 m/s)		elastic wave velocity ≥ 300 m/s, Ground SPT-N Value ≥ 50	
Design response spectrum	$S_a = 2.5 C_a \cdot I$ <ul style="list-style-type: none"> damping ratio by performance level (h) · serviceability limit state : h=0.1 · collapse prevention level : h=0.2 (period 0.4s : 0.196m/s, collapse prevention level) 		S_v : Application of response velocity spectrum per unit seismic intensity <ul style="list-style-type: none"> · damping ratio : 0.2 (strong earthquake) · Design response velocity (period 0.10s \rightarrow 0.175m/s) (period 0.25s \rightarrow 0.570m/s) (period \geq 0.50s \rightarrow 0.800m/s : final limit state) 	
Design horizontal seismic coefficient	Design horizontal seismic coefficient of SA ground <ul style="list-style-type: none"> · $K_H = C_a \cdot I$ C_a : seismic coefficient I region : 0.09 II region : 0.05 · I : risk factor serviceability limit state : 0.57 collapse prevention level : 1.40 		K_H' : horizontal seismic intensity acting on surface ground <ul style="list-style-type: none"> · $K_H' = \frac{1}{B_G} \frac{K_h}{C_G}$ B_G: amplification coefficient of surface ground C_G : correction factor by ground (I : 0.8, II : 0.85, III : 0.7) · $K_h = C_2 \cdot C_G \cdot K_{ho}$ K_{ho}: standard value of design horizontal seismic intensity (serviceability limit state : 0.2, final limit state : 1.0) C_2 : region scaling factor (A : 1.0, B : 0.85, C : 0.7) · $K_H' = \frac{1}{B_G} C_2 \cdot K_{ho}$ 	

3. 수치해석 및 결과분석

3.1 대상 구조물 선정

본 연구에서는 지진시 구조적 거동특성을 분석하기 위하여 1) 완전 지중구조물이며 횡 방향 변위가 허용되는 공동구 구조물, 2) 반지중 구조물이며 상부가 지상에 개방된 침전지 구조물, 3) 횡 방향 변위가 구속되는 정수지 구조물로 구분하여 내진 기준에 따라서 해석하였으며, 선정 이유는 Table 2와 같다.

3.2 해석방법 및 모델링

3.2.1 적용 지반조건 및 해석방법

본 연구의 내진해석에서 고려한 지반조건은 지표면 아

래 30m 이내 기반암(S_B 보통암 지반)인 보통암이 존재하고 $N=20$ 정도의 단단한 토사층(S_D)에 구조물이 놓인 경우로 가정하여 지진해석을 수행하였다. 해석조건 및 지반조건은 Table 3과 같고 지진해석법(Park, 2005)에 대한 비교 분석을 위해서, 유사정적해석법과 응답변위법을 적용하였으며, 해석을 위하여 범용해석프로그램인 Midas Civil을 사용하였다.

3.2.2 해석 모델링

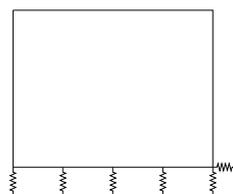
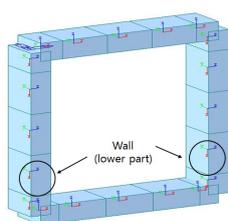
지진해석 모델링은 구조물-지반의 상호작용(Structure-Soil Interaction, SSI)을 고려하여 구조물의 거동특성에 따라 2-D 또는 3-D 모델링을 적용하고, 지반의 탄성 경계 스프링 요소를 사용한다. 본 연구에서는 Fig. 1, 2, 3 같이 공동구와 침전지 구조물은 1-방향 부재로 구성되어 있어

Table 2. Reasons for selection of target structures

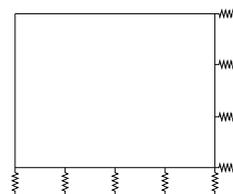
Division	Type	Reason for selection
Utility-pipe conduit	- completely underground - top closed - rectangle	<ul style="list-style-type: none"> As a completely underground structure, the installation depth is varied, and it behaves in one direction, but the lateral constraint conditions are different depending on the soil pressure conditions, so the active or static earth pressure is applied. A typical structure that installs various life-lines in a box type and is commonly installed in water and sewage treatment plants for maintenance.
Sedimentation basin	- semi underground - top open - rectangle	<ul style="list-style-type: none"> Since it is a semi underground structure and there is no top slab, the wall member behaves as a cantilever, so it is judged to be the most unfavorable structure in case of an earthquake. It represents a tank structure that has an open top and stores water with an effective depth of 5m or less.
Water treatment plant	- completely underground - top closed - rectangle	<ul style="list-style-type: none"> It is a completely underground structure and is considered to be the most advantageous tank structure for earthquakes as it is a completely underground structure and does not cause lateral displacement. The sewage treatment plant to be built recently is completely underground and is planned similarly to the structure of the water purification plant.

Table 3. Applied seismic analysis method and conditions of target structures

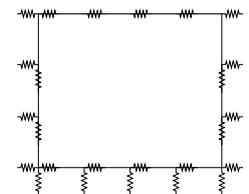
Division	Analysis condition & soil condition	Analysis method
Utility-pipe conduit (m) (4.0×4.0)	<ul style="list-style-type: none"> (t) top slab 0.40m wall 0.35m lower slab 0.45m water level = GL(-)1.00m 	pseudo-static analysis method & response displacement method
Sedimentation basin (m) (54.60×44.90×6.05)	<ul style="list-style-type: none"> (t) outer wall 0.60m inner wall 0.50m lower slab 0.70m no water level 	
Water treatment plant (m) (42.35×36.90×4.45)	<ul style="list-style-type: none"> (t) top slab 0.25m wall 0.45m lower slab 0.50m water level = GL(-)2.50m 	



(a) Normal



(b) Pseudo-static analysis



(c) Response displacement method

Fig. 1. 2-D Frame Modeling (utility-pipe conduit)

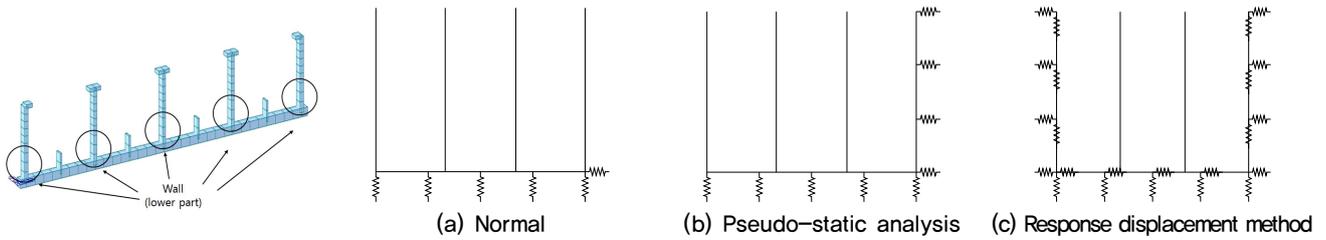


Fig. 2. 2-D Frame Modeling (sedimentation basin)

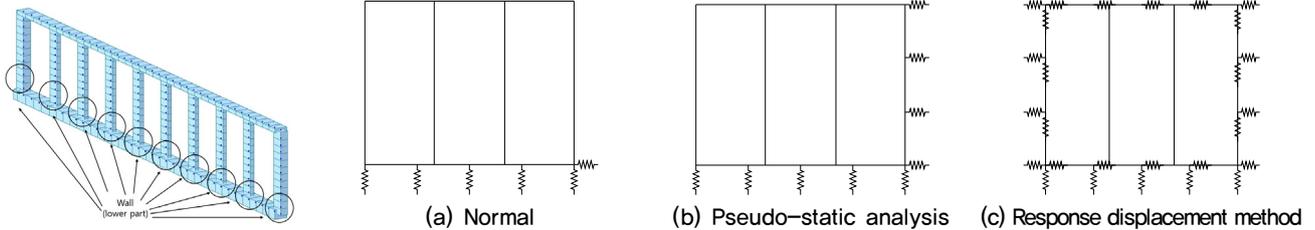


Fig. 3. 3-D Shell Modeling (water treatment plant)

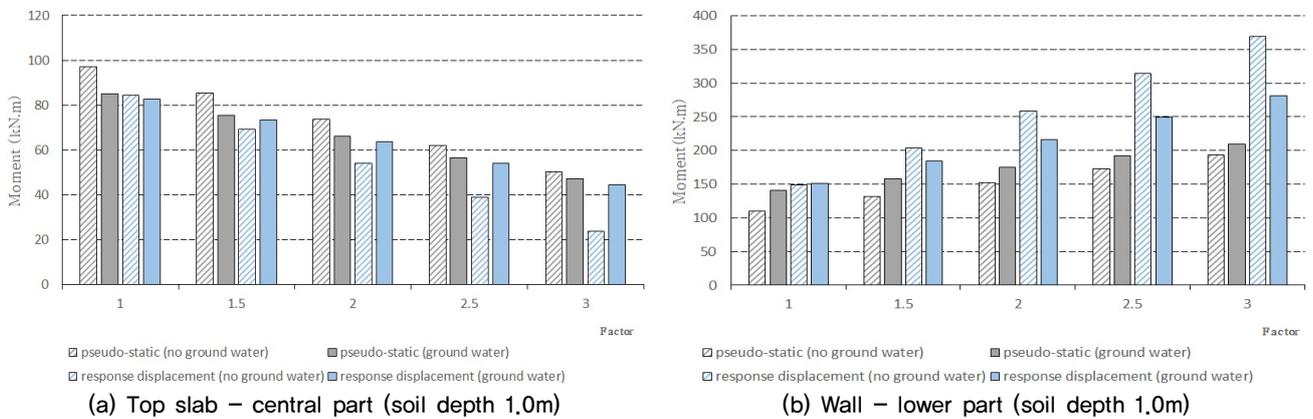


Fig. 4. Results of section force of utility-pipe conduit according to analysis method

2-D Frame Modeling을 적용하고, 정수지 구조물에 대해서는 3-D Shell Modeling을 적용하였다. 유사정적해석법은 기초 지반에 대해 수직 방향 스프링과 지진력 반대 방향 벽체에 수평 방향 스프링을 적용하고, 응답변위법은 전부재에 대해 수평 또는 수직 스프링과 전단 스프링을 적용하였다. 그러나 응답변위법의 경우 지반 스프링이 압축에 대해서만 유효하므로 인장 반력이 발생하는 경우 해석 프로그램에 의해 자동으로 제거되도록 하였다.

3.2.3 적용 변수 선정 및 결과분석 방법

본 연구에 적용되는 변수는 수처리 지중구조물의 내진 특성을 연구하고자 구조물 심도, 지하수 유무 및 하중 계수 증분에 따른 하중특성을 분석하고, 평상시와 지진시로 나누어 구조해석을 수행하여 비교·분석하였다. 특히 지진시는 지반경계조건과 지진 세기에 따른 단면력 변화를 관

찰하고자 하중증가계수와 가속도계수를 변수로 구조해석을 수행하였다.

3.3 결과분석

3.3.1 공동구 구조물

(1) 해석 단면력 산정 분석결과

토포고 1.0m에 대한 지하수 유무 및 하중증가계수 즉, 가속도 설계값을 기준치의 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0배 증가시키면서 결과를 분석하고 회기분석 식을 제시하였다. 구조 해석 결과는 Fig. 4와 같다.

상부슬래브보다 상대적으로 단면력이 큰 벽체부재 하단부를 중심으로 해석 결과를 분석하면, 지하수가 없을 때, 하중증가계수 증가 시 단면력은 유사정적해석법 각각 110.57~193.41kN·m, 응답변위법 각각 148.43~369.28kN·m

(2) 제안식 도출(양측토압)

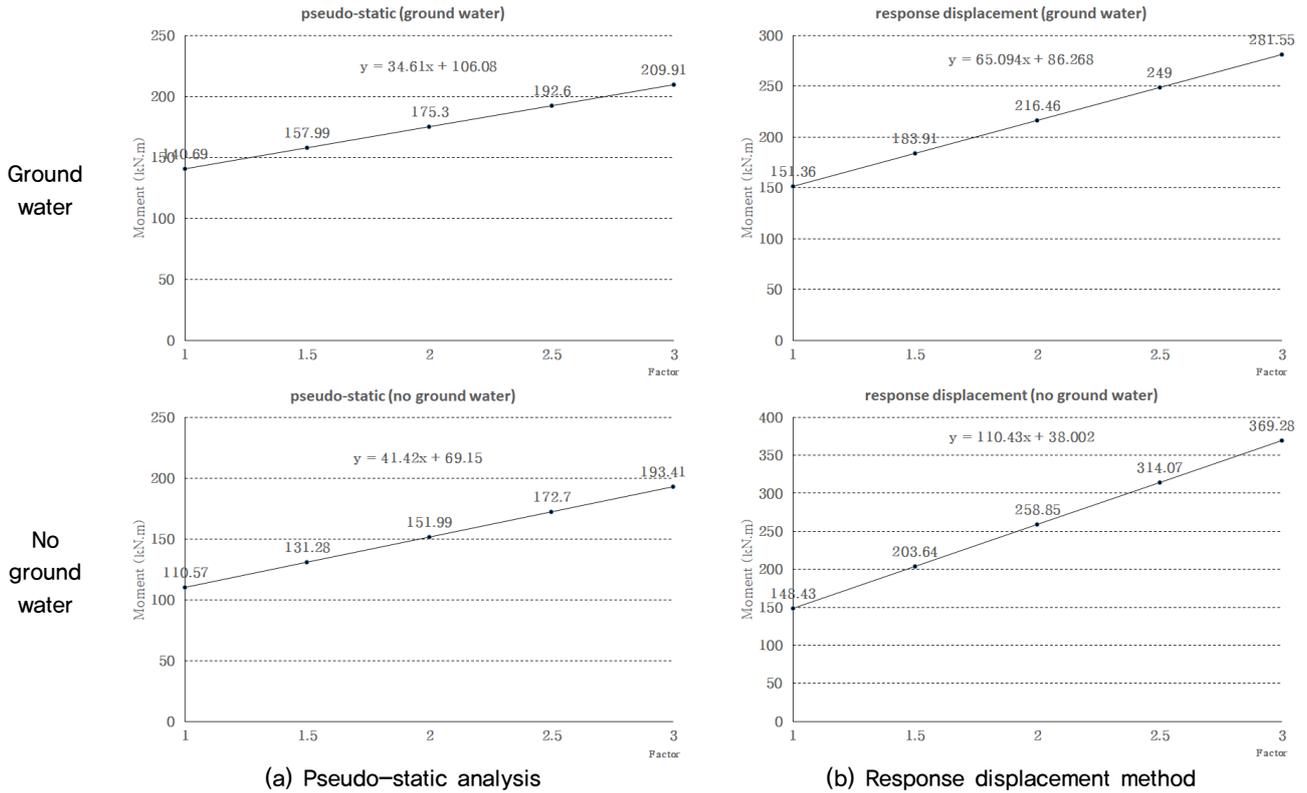


Fig. 5. Derive a proposed formula for utility-pipe conduit

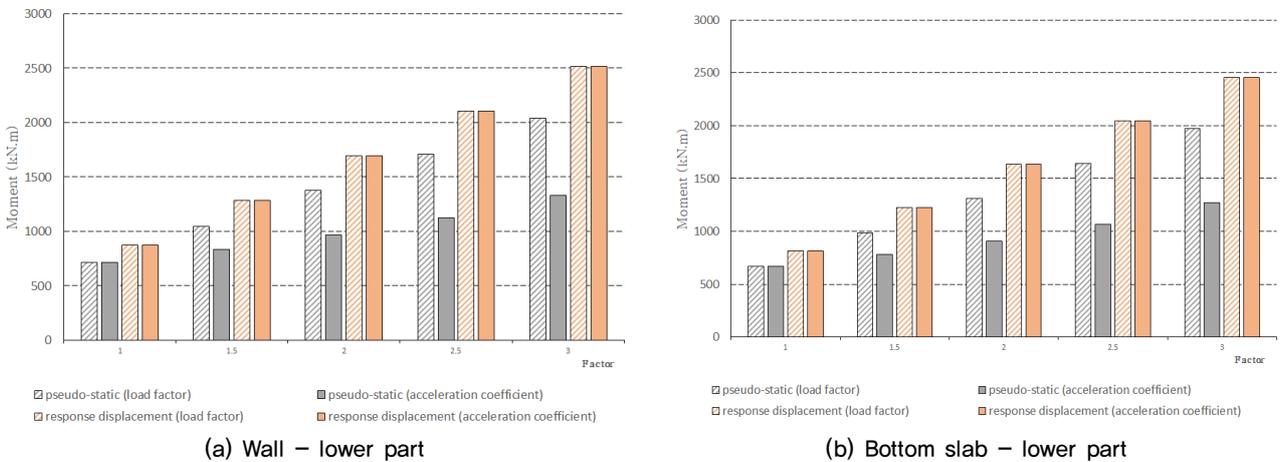


Fig. 6. Results of section force of sedimentation basin according to analysis method

로 나타났다. 이에 따른 단면력 비(응답변위법/유사정적해석법)는 각각 1.34~1.91배로 증가하였다. 지하수가 있을 때, 단면력은 유사정적해석법 각각 140.69~203.91kN·m, 응답변위법 각각 151.36~281.55kN·m로 나타났다. 이에 따른 단면력 비는 각각 1.08~1.34배로 증가하였다. 이를 통해 지하수가 있는 경우, 없는 경우보다 응답변위법의 하중평가가 상대적으로 작아지는 것으로 나타났다. 위의 해석결과에 대한 단면력 제안식을 Fig. 5에 나타내었다.

3.3.2 침전지

(1) 해석 단면력 산정 분석결과

침전지 구조물 특성상 상부슬래브가 없는 반지중 구조물은 특히 부력에 취약하여 지하수가 바닥 슬래브 바닥으로부터 1.0m 이상만 상승하여도 불안전하게 평가되어 본 연구에서는 지하수가 있는 경우는 생략하였다. 지하수가 없는 경우 하중증가계수(load factor)와 가속도계수(Acceleration coefficient)를 변수로 지진해석방법에 따라 수행한 구조해

(2) 제안식 도출(양측도압)

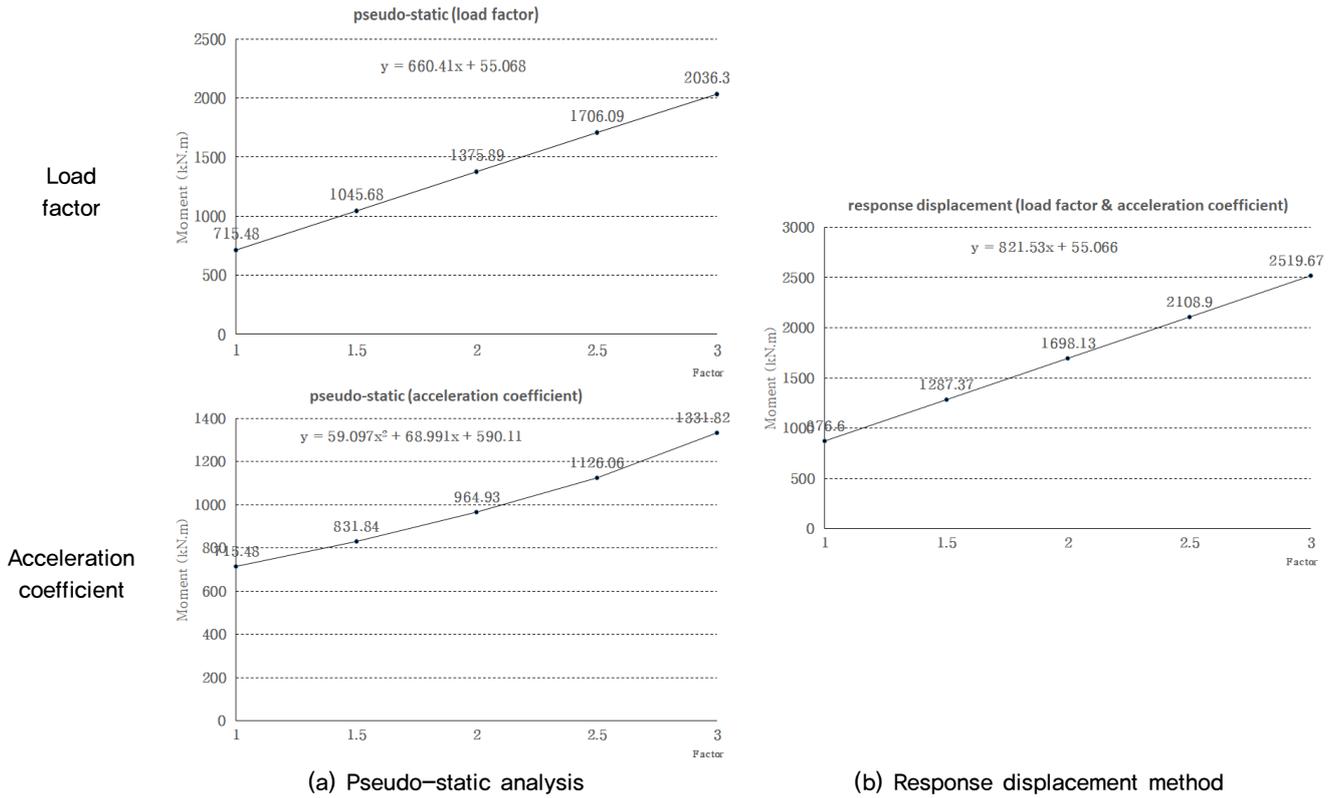


Fig. 7. Derive a proposed formula for sedimentation basin

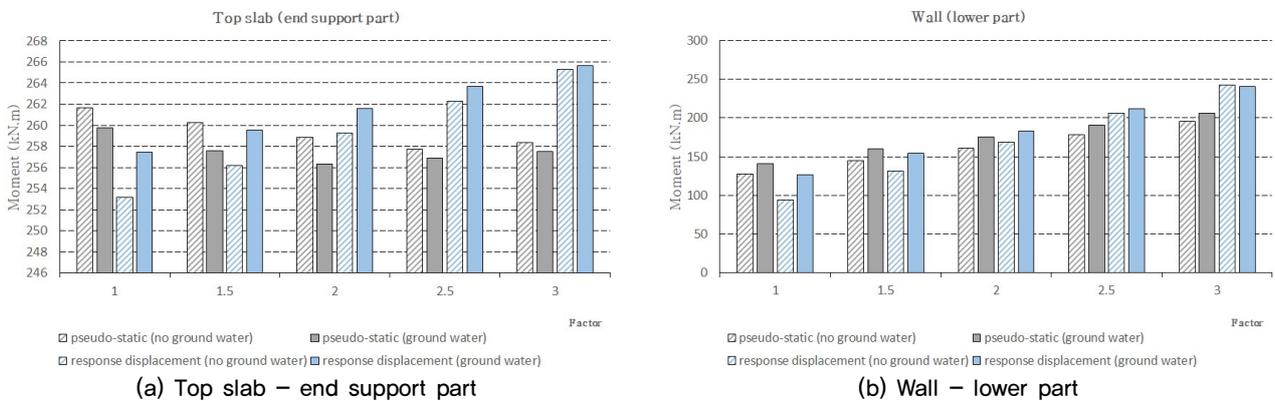


Fig. 8. Results of section force of water treatment plant according to analysis method

석 결과는 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

횡방향 변위 구속 효과가 없는 캔틸레버 거동을 하는 구조물이므로 하부슬래브보다는 주부재인 벽체중심으로 해석 결과를 분석하면, 지하수가 없을 때, 하중증가계수 증가시 단면력은 유사정적해석법 각각 715.48~2036.3kN·m, 응답변위법 각각 876.6~2519.67kN·m로 나타났다. 이에 따른 단면력 비는 각각 1.23~1.24배로 소폭 증가하였다. 또한, 가속도계수 증가시 단면력은 유사정적해석법 각각 715.48~1331.82kN·m, 응답변위법 각각 876.6~2519.67kN·m로 나타났다. 이에 따른 단면력 비는 각각 1.23~1.89배로 증가하였다. 이를 통해 가속

도계수 증가시의 경우와 비교하여 하중증가계수 증가시, 유사정적해석법의 하중평가가 상대적으로 커지는 것으로 나타났다.

3.3.3 정수지 구조물

(1) 해석 단면력 산정 분석결과

지하수 유무 및 하중증가계수(load factor)를 변수로 지진해석방법에 따라 수행한 구조해석 결과는 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

구조물 폭과 길이가 길고 횡방향 변위가 구속되어 있는

(2) 제안식 도출(양측토압)

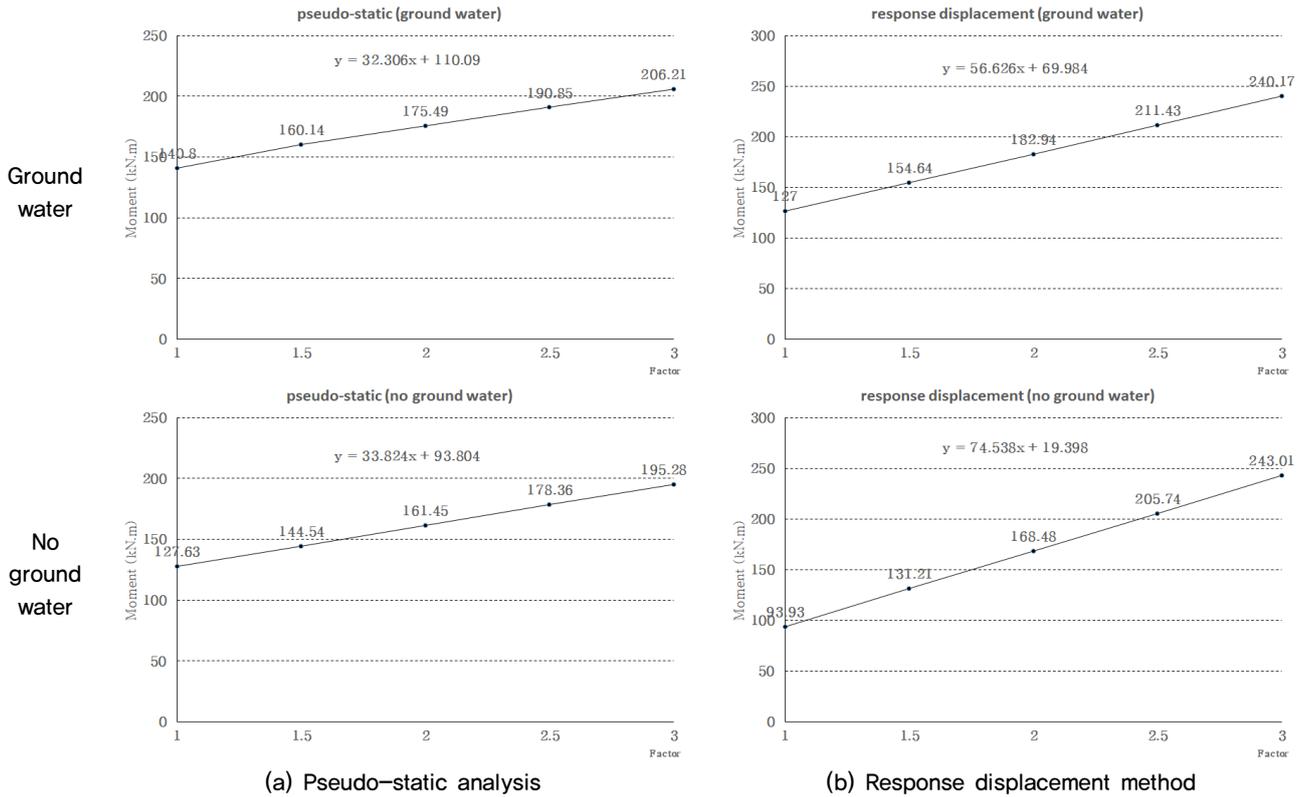


Fig. 9. Derive a proposed formula for water treatment plant

구조물이므로 상부슬래브보다는 주부재인 벽체중심으로 해석 결과를 분석하면, 지하수가 없을 때, 하중증가계수 증가 시 단면력은 유사정적해석법 각각 127.63~195.28kN·m, 응답변위법 각각 93.93~243.01kN·m로 나타났다. 이에 따른 단면력 비는 각각 0.74~1.24배로 증가하였다. 지하수가 있을 때, 단면력은 유사정적해석법 각각 140.80~206.21kN·m, 응답변위법 각각 127.00~240.17kN·m로 나타났다. 이에 따른 단면력 비는 각각 0.90~1.16배로 증가하였다. 이를 통해 타 구조물과 다르게 주부재인 벽체 하단부의 경우 하중증가계수가 1.0, 1.5배 증가 시에 응답변위법의 단면력이 유사정적해석법보다 작은 것으로 나타났는데 이는 단면이 넓은 정수지 구조물의 벽체에 설치된 전단 스프링의 영향으로 판단된다.

4. 결론

지중 내 설치되는 대표적인 수처리 구조물 중 거동특성이 서로 다른 공동구, 침전지 및 정수지 구조물에 대해 향후 내진설계 기준 개선에 부응하고자 가속도계수 및 하중증가계수 증분에 따라 수치해석을 수행하여 단면력 제안

식을 제안하였고, 지진해석법에 따른 구조해석 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

4.1 공동구 구조물

완전 지중구조물인 공동구 구조물은 양측 토압조건, 지하수유무, 토피고 1m, 하중증가계수를 변수로 지진해석법에 따른 단면력 결과 및 제안식을 도출하였다.

구조해석 결과 주부재인 벽체 하단부의 경우, 지하수가 존재할 때 응답변위법의 하중평가가 유사정적해석법보다 상대적으로 작아지는 것으로 나타났다. 이는 응답변위법 특성상, 지하수 유무에 따른 토사의 단위중량비 또는 질량비가 하중증가계수 증분에 따라 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 침전지 구조물

반지중 구조물인 침전지 구조물은 양측 토압조건, 지하수가 없는 경우, 하중증가계수와 가속도계수를 변수로 지진해석법에 따른 단면력 결과 및 제안식을 도출하였다.

구조해석 결과 주부재인 벽체 하단부의 경우, 하중증가

계수 증가 시 유사정적해석법의 하중평가가 상대적으로 커지는 것으로 나타났다. 이는 침전지 구조물은 상부슬래브가 없는 반지중 구조물로 지진시 단면력이 평상시보다 지배적이기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 정수지 구조물

완전 지중구조물이며 측벽과 내부 기둥에 의해 횡방향 변위가 구속되어 있는 정수지 구조물은 양측 토압조건, 지하수유무 및 하중증가계수를 변수로 지진해석법에 따른 단면력 결과 및 제안식을 도출하였다.

구조해석 결과 주부재인 벽체 하단부의 경우, 하중증가 계수가 1.0, 1.5배 증가 시, 타 구조물의 단면력과는 다르게 응답변위법의 단면력이 유사정적해석법의 단면력보다

작은 것으로 나타났다. 이는 단면이 넓은 정수지 구조물의 벽체에 설치된 전단스프링의 영향으로 판단된다.

References

1. Chung, K. -M. (2013), "Analytical Study for the Establishment of Standard Requirement in Seismic Design of Water Treatment Underground Structures".
2. Ministry of Environment (1999), Study for Establishment of Seismic Design Standards for Waterworks Facilities.
3. Ministry of Environment (2009), Study for Seismic Standards for Sewerage Facilities.
4. Park, J. -W. (2005), "A Study on Seismic Analysis of Underground Structures Using Response Displacement Method", Kunsan National University, pp.18-28.