

2024년 춘계학술발표대회 : 일반부문

## 지반반력계수를 고려한 지하구조물의 강성 추정

### Stiffness Estimation of Substructure Considering Soil Reaction Coefficients

○김 영 일\*      성 혜 정\*      김 동 관\*\*      김 호 수\*\*  
Kim, Young-Il      Sung, Hye-Jung      Kim, Dong-Kwan      Kim, Ho-Soo

#### Abstract

The response of the underground structure to the earthquake tends to be very different from that of the ground structure affected by the natural cycle. Underground structures have displacement similar to ground vibration because they cannot vibrate freely due to the surrounding ground. As the analysis method according to this, it is recommended to use the response displacement method, which can be interpreted only as the relationship between the rigidity and the load of the structure. Therefore, in this study, an experiment was conducted to find out the rigidity and behavior of underground structures of various sizes using the response displacement method. This study proposes a simplified model that can predict the rigidity and behavior of the actual structure by comparing the rigidity and behavior of the structure appearing in the existing 3D model with a simplified 2D model. Structural analysis was performed by selecting a structure with four conditions. As a result of the experiment, it was found that the displacement generated in the 2D structure increased by about 30-40% compared to the displacement in the existing 3D structure. In other words, it was judged that the structure can be designed more safely if the structural design is carried out based on the 2D structure.

키워드 : 지하구조물, 지반반력계수, 강성추정

Keywords : Substructure, Soil Reaction Coefficient, Stiffness Estimation

#### 1. 서론

##### 1.1 연구배경 및 목적

2016년 9월 12일 대한민국 경주에서 5.8의 지진이 발생했다. 이는 1978년 기상청이 계기지진 관측을 시작한 이후로 한국에서 일어난 지진 가운데 최대 규모였다. 이에 따라서 지진안전구역으로 인식되던 과거와는 달리 규모 3.0 이상의 실제적인 재산피해와 인명 손실을 일으킬 가능성이 있는 지진의 발생빈도가 증가함에 따라 내진설계의 중요성이 대두되었다. 또한, 효율적인 대지 사용이 필요해지면서 대형 및 초고층 건축물을 요구하고 있으며 지하구조물의 내진설계에 대한 중요성이 강조되고 있다.

지상구조물의 경우 구조물의 중량이 주변 매개체인 공기보다 매우 크기 때문에 구조물의 관성력이 응답에 큰 영향력을 미친다. 반면 지하구조물은 주변 지반 때문에 자유롭게 진동할 수 없으므로 지상구조물에 비해 매우 큰 감쇠가 발생하며, 변위 거동도 지반 진동과 유사하다. 즉, 지진 발생 시 지하구조물의 응답은 구조물의 질량에 의한 관성력보다 지반의 상대 변위에 영향을 받는다.

따라서 지하구조물은 지반과 접하여 있으므로 지진 발

생 시 지하구조물의 응답은 상대 변위에 많은 영향을 미치는데 이에 따른 해석방법은 시간이력해석법, 응답변위법, 등가정적해석법이 사용되고 있다. 위 3가지 해석방법 중 주변 지반의 변위로 인해 지하구조물에 발생하는 응력을 추가적인 정적하중으로 고려하는 방법이며, 구조체의 강성과 하중 관계만으로 해석을 실행할 수 있다는 것에서 응답변위법으로 해석할 것을 권장하고 있으므로 본 연구에서는 응답변위법을 이용한 지하구조물의 내진해석을 실시하였다.

본 연구에서는 응답변위법의 적용 절차를 3차원 모델에서 수행한 뒤, 비교적 단순화된 2차원 모델의 강성과 거동을 비교하여 실무에서도 구조물의 강성과 거동에 예측이 가능한 응답변위법의 단순화된 모델을 제안하고자 한다. 또한 구조물에 발생하는 변위와 강성을 비교하기 위해 다양한 구조물의 규모를 설정하여 해석을 실행하였고, 구조물에 대한 지진의 발생 방향은 단일적이지 않으므로 x축과 y축의 길이비가 다른 구조물을 활용하여 지진의 입사 방향에 따른 강성비를 비교하고자 한다.

##### 1.2 연구내용 및 방법

지반반력계수를 활용한 3차원 구조물은 기존의 응답변위법을 활용하여 프레임 요소로 모형화하고, 구조물을 슬래브, 중간 기둥 및 측벽 등으로 구성하는 라멘 구조로 형상화한다. 이후 지하구조물을 주변 지반의 조건에 따라 지반반력계수를 산정하고 구조물에 지반 스프링으로 부착하여 해석모델을 완성한다. 구성된 구조모델에 지진운동으로

\* 청주대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Cheongju University, qwer1919er@gmail.com)

이 연구는 2024년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 결과의 일부임.

인해 발생하는 주변 지반의 상대 변위를 먼저 구하고 이 변위에 의해 지하구조물에도 같은 변위가 발생한다고 가정하여 구조물의 응력 등을 구하는 방법으로(Kim et al., 2010) 3차원 구조물을 선정한다.

지진토압을 적용한 3차원 구조물은 지반반력계수를 적용한 구조물의 수평지반반력계수를 이용하여 구한 변위를 지진토압으로 치환한 후, 같은 조건의 3차원 구조물에서 지반 스프링을 제거한 뒤 지진토압을 작용시킨다.

등분포하중을 적용한 3차원 구조물은 지진토압을 적용한 구조물에서 지진토압이 작용하는 면적을 활용해 등분포하중으로 치환하여 3차원 구조물에 작용시킨다.

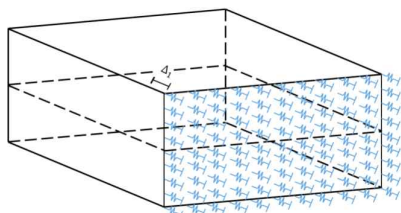
집중하중을 적용한 2차원 구조물은 3차원 구조물의 측벽을 이용해 2차원 구조물로 변형시키고, 등분포하중을 집중하중으로 치환한다. 이때 집중하중으로 등분포하중을 작용시킨 방향과 위치에 동일하게 작용시킨다. 이러한 4가지 모델을 이용하여 도출된 강성을 비교·분석하고, 단순화된 2차원 모델을 제안하고자 한다.

지진의 입사방향에 따른 지하구조물의 강성비를 비교하기 위한 해석구조물은 본 연구의 해석구조물 중 x축 방향의 벽체와 y축 방향의 벽체의 길이 비가 다른 두 개의 구조물을 평면으로 표현한다. 이후 구조물의 각도를 10° ~ 90° 까지 10° 간격으로 조절하여 같은 지반변위를 작용하고 도출된 강성을 비교하고자 한다.

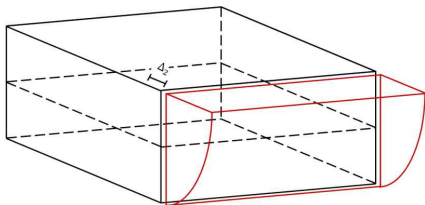
## 2. 대상 구조물 선정 및 모델링

### 2.1 구조물 선정

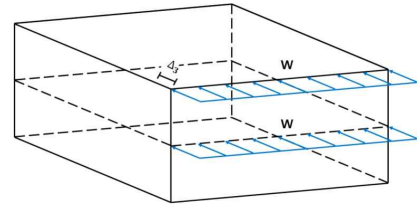
일반적으로 응답변위법을 이용한 지하구조물의 내진설계는 여러 연구가 진행되었지만, 지반의 동적인 특성을 반영하기 위해서는 고도의 전문지식이 필요하며 앞서 설명한 해석 절차의 난이도가 실무에 적용되기 어려움이 있어 정작 실무에서는 사용하지 않고 대규모의 공공구조물에만 적용되어 왔다. 본 연구에서는 실무에서도 적용이 가능한 응답변위법의 단순화된 모델을 제안하기 위해 아래의 그림 2.1과 같이 크게 4개의 모델로 강성과 거동을 비교하고자 한다.



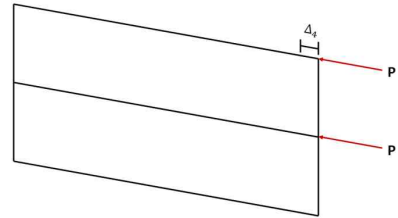
a) 지반반력계수를 적용한 3차원 모델



b) 지진토압을 적용한 3차원 모델



c) 등분포하중을 적용한 3차원 모델



d) 집중하중을 적용한 2차원 모델

그림 2.1 구조물 선정

### 2.2 구조물 모델링

지하구조물은 모두 Midas Gen 프로그램을 이용하여 모델링하였다. 1층에 해당하는 벽체의 두께는 0.4m로 모두 동일하게 적용하였고 3차원 구조물 및 2차원 구조물 모두 비교 기준인 z축 벽체의 길이는 5m, 10m 2가지로 나누어 비교하였으며, y축 벽체의 길이는 50m 간격으로 50m, 100m, 150m, 200m 4개로 나누어 총 8가지의 구조물을 모델링하였다. 모델링 한 각각의 구조물에 지반의 변위, 지진토압, 등분포하중, 집중하중을 적용하여(그림 2.1) 구조물에 발생하는 변위 즉, 거동과 강성을 비교하는 것을 목적으로 한다. 또한, 본 예제 구조물의 콘크리트의 재료특성값(표 2.1)을 설정하였으며 바닥층 절점의 변위 자유도를 종속시켰다.

표 2.1 콘크리트의 재료특성 (Midas Gen의 Properties 입력 값)

설계기준강도 $f_{ck}$ (MPa)	탄성계수 (MPa)	포아송비 $\nu$	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )
24	25791	0.167	23.54

## 3. 대상 구조물 종합 해석 및 결과

본 연구에서 수행한 Midas Gen 프로그램을 이용한 구조물 해석의 종합적인 결과는 다음과 같다.

### 3.1 구조물에 발생하는 변위 비교

구조물에 발생한 변위(표 3.1)는 벽체의 깊이가 5m의 구조물은 3차원 지반반력계수 구조물에서 2차원 집중하중 구조물로 치환하는 과정에서 변위가 약 30~40%가 증가하는 것을 알 수 있고, 벽체의 깊이가 10m인 구조물의 경우에는 약 170~190%가 증가하는 것으로 나타난다.

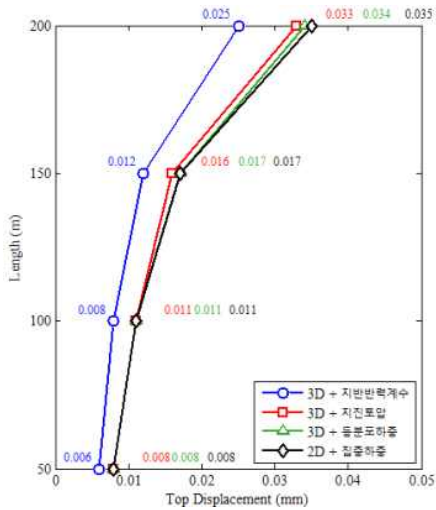
표 3.1 해석구조물에 발생한 변위

벽체 깊이 (m)	y축 벽체 길이 (m)	3D	3D	3D	2D
		지반반력계수	지진토압	등분포하중	집중하중
$\delta$ : 변위 (mm)					
5	50	0.025	0.033	0.034	0.035
	100	0.012	0.016	0.017	0.017
	150	0.008	0.011	0.011	0.011
	200	0.006	0.008	0.008	0.008
10	50	0.192	0.521	0.525	0.555
	100	0.094	0.251	0.252	0.256
	150	0.062	0.165	0.166	0.166
	200	0.046	0.123	0.124	0.123

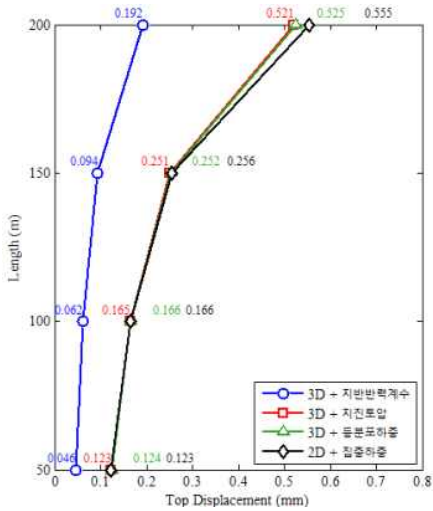
반력계수 구조물 대비 집중하중 구조물의 강성이 증가하는 것으로 나타났다. 벽체의 깊이가 5m의 경우 1~3%로 감소하며, 비교적 큰 차이가 없는 것으로 나타났고, 10m의 경우 10~20%로 깊이가 증가할수록 강성의 크기도 증가하는 것으로 도출되었다.

표 3.2 해석구조물에 발생한 변위와 반력에 따른 강성

벽체 깊이 (m)	y축 벽체 길이 (m)	3D	3D	3D	2D
		지반반력계수	지진토압	등분포하중	집중하중
$k$ : 벽체의 강성 ( $\times 10^6$ kN/m)					
5	50	126.6	141.1	123.1	122.2
	100	257.9	287.5	250.9	253.8
	150	389.1	433.9	378.6	385.5
	200	520.3	580.3	506.3	517.1
10	50	47.9	65.3	58.4	55.2
	100	99.4	135.6	121.4	119.8
	150	151.0	206.0	184.4	184.4
	200	202.5	276.3	247.4	249.0



a) 벽체의 깊이 5 m

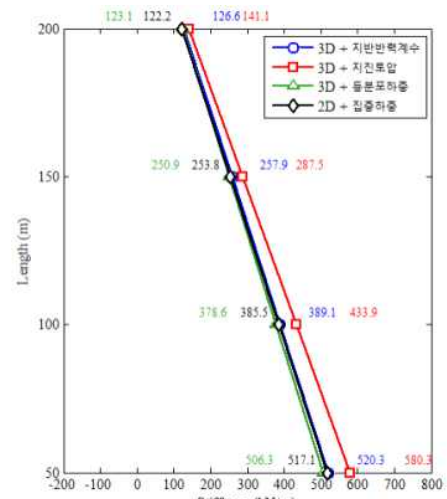


b) 벽체의 깊이 10 m

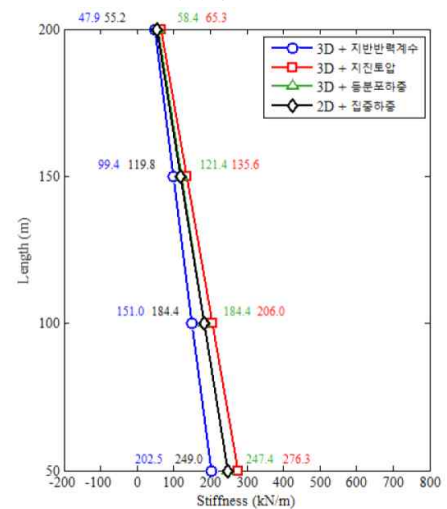
그림 3.1 해석구조물에 발생한 변위

### 3.2 구조물의 강성 비교

강성의 경우에는 해석 결과(표 3.2)에 따라 벽체의 깊이를 기준으로 깊이가 5m인 구조물에서는 강성이 지반반력계수를 적용한 3차원 구조물 대비 집중하중을 적용한 2차원 구조물의 강성은 감소하고, 10m인 구조물에서는 지반



a) 벽체의 깊이 5 m



b) 벽체의 깊이 10 m

그림 3.2 해석구조물에 발생한 변위와 반력에 따른 강성

### 3.3 구조물의 규모와 지진의 입사 방향에 따른 강성

지진의 입사 방향에 따른 지하구조물의 강성은 해석 결과(표 3.3)에 따라 y축 벽체의 규모가 100m일 때, 회전 각도가 0° 인 구조물 기준으로 90° 인 구조물의 강성비는 2.03으로 나타났다. 100m×50m×5m의 구조물이 x축 벽체 규모가 y축 벽체의 규모의 2배임에 따라 구조물을 90° 회전하였을 때의 강성비가 약 2배로 비례하게 증가하였다.

y축 벽체의 규모가 150m일 때, 회전 각도가 0° 인 구조물 기준으로 90° 인 구조물의 강성비는 3.06으로 나타났다. 150m×50m×5m의 구조물이 x축 벽체 규모가 y축 벽체의 규모의 3배임에 따라 구조물을 90° 회전하였을 때의 강성비가 약 3배로 비례하게 증가하였다.

표 3.3 지진의 입사 방향에 따른 지하구조물의 종합 강성비

y축 벽체의 길이 (m)	회전각도 (°)	지반변위 (m)	k : 강성 (×10 <sup>6</sup> kN/m)	강성비 (%)
100	0	0.001	107.4	1.00
	10		109.0	1.02
	20		114.1	1.06
	30		123.0	1.15
	40		135.8	1.27
	50		152.9	1.42
	60		173.3	1.61
	70		194.5	1.81
	80		211.3	1.97
	90		217.9	2.03
150	0	0.001	107.4	1.00
	10		109.6	1.02
	20		116.5	1.09
	30		129.1	1.20
	40		148.7	1.39
	50		177.5	1.65
	60		216.8	2.02
	70		264.6	2.46
	80		309.2	2.88
	90		328.4	3.06

## 4. 결론

본 연구에서는 지하구조물의 해석방법 중 응답변위법의 적용 절차를 단순화시켜 실무에서도 사용할 수 있는 해석모델을 제안하고자 한다. 구조물의 규모와 해석방법에 따른 총 32개 지하구조물의 강성과 거동을 비교·분석하여 본 연구의 해석 모델에서 지반반력계수와 지반의 상대 변위를 적용한 3차원 구조물을 집중하중을 적용한 2차원 구조물로 변환시켰을 때의 구조물에 발생하는 변위와 그에 따라 도출되는 강성을 비교·분석하는 것에 중점을 두었고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 연구에서 구조해석을 실행한 모든 구조물에서 z축 방향 벽체의 규모가 증가할수록 구조물에 발생하는 변

위는 증가하는 것으로 나타났다. 반대로 하중에 직접적인 영향을 받는 y축 방향 벽체의 규모가 증가할수록 변위는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 벽체의 강성은 하중을 받는 방향의 벽체 규모가 증가할수록 증가하고 벽체의 높이가 증가할수록 감소하는 것으로 반비례관계인 것을 알 수 있었다.

2) 지진의 입사 방향에 따른 지하구조물의 강성은 지진의 입사 방향이 10° ~ 90° 까지 10° 증가함에 따라 y축 벽체의 규모는 50m에서 (100, 150)m로 증가하기 때문에 1)과 동일하게 강성이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 하중의 영향을 직접적으로 받는 벽체의 규모가 증가할수록 강성이 증가하는 비례관계인 것을 알 수 있었다.

3) 해석모델에 발생하는 변위는 구조물을 3차원에서 2차원으로 변환할 시 y축 방향 벽체의 규모가 (50, 100, 150, 200)m의 해석모델에서 벽체의 깊이가 5m의 경우 약 30~40% 증가하며, 벽체의 깊이가 10m의 경우에는 170~190% 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해 구조물에 발생하는 변위가 증가하므로 3차원 구조물에서 2차원 구조물로 변환하여 구조해석을 실행할 경우, 3차원 구조물 대비 2차원 구조물의 증가한 변위를 고려함으로써 안전성을 증가시킬 수 있다고 판단된다.

4) 구조물에 발생한 변위와 반력으로 산정한 강성은 앞서 언급한 벽체의 규모 4가지의 해석모델에서 벽체의 깊이가 5m의 경우 1~3% 감소하였고, 벽체의 깊이가 10m의 경우는 10~20% 증가하는 양상으로 나타났다. 그러므로 구조물에 발생하는 변위 대비 강성의 차이는 미미한 것으로 판단된다.

따라서 4개의 모델 중 비교적 변위가 크며, 강성의 차이가 미미한 집중하중을 적용한 2차원 구조물을 기준으로 구조설계를 진행한다면 더욱 안전하게 설계할 수 있는 것으로 사료된다. 하지만 본 연구에서는 평균전단파속도( $V_s$ )를 설정하고 그에 적용할 수 있는 지반 조건을  $S_3$ 로 한정하여 구조해석을 진행하였다. 또한 지하구조물의 깊이를 (5, 10)m로 한정하였기 때문에 다양한 구조물의 규모와 고려해야 하는 평균전단파속도( $V_s$ ), 지반 조건 등의 폭넓은 해석이 필요하다.

## 참고문헌

1. 박진우, 응답변위법을 이용한 지중구조물의 지진해석에 관한 연구, 2006
2. 이병로, 김두기, 응답변위법을 사용한 지중구조물의 지진해석, 2009
3. 장호규, 지하구조물의 성능기반 내진설계 고찰, 2017
4. 추연욱, 응답변위법을 이용한 지하구조물, 한국지반공학회, 2021
5. 대한건축학회, 건축구조기준(KBC 2009)
6. 대한건축학회, 건축물 내진설계 기준(KDS 41 17 00), 2019
7. 대한건축학회, 건축물의 지하구조 내진설계 지침, 2020
8. 한국지진공학회, 내진설계 일반(KDS 17 10 00), 2018