

## 수평지반반력계수를 적용한 잔교식 안벽의 설계사례 Application of the Lateral Subgrade Reaction Modulus in Landing Pier Design

박시범<sup>1</sup>, 안창섭<sup>2</sup>, 김지용<sup>3</sup>, 최병렬<sup>4</sup>  
 See Boum Park<sup>1</sup>, Chang Seob An<sup>2</sup>, Ji Yong Kim<sup>3</sup> and Byoung Yeol Choi<sup>4</sup>

### 1. INTRODUCTION

항만시설물 중 계류시설은 선박의 접,이안을 통하여 화물의 하역이나 승객의 승강을 할 수 있도록 한 시설을 말한다. 잔교(Landing Pier)는 이러한 종류의 구조물로서 육지와 연결을 일종의 교량구조로서 하부는 여러개의 직항또는 사항의 말뚝으로 구성되어 있으며, 상부Slab (RC상판)와 일체화한 형태의 항만시설 구조물이다. 잔교식 안벽(Quay Wall)의 말뚝 설계에 있어 현재 실무에서 보편적으로 사용하는 방법은 “항만 및 어항설계기준(2005 해양수산부)”에 의한 가상고정점법(Approximate Depth of Pile Supported Method)이다. 이 가상고정점법은 해저지반 중에 고정점을 가정하여 라멘으로 계산하는 경우와, Chang(1937)에 의한 제1부동점을 가상고정점으로 하는 방법이 있다. 가상고정점을 쓰는 방법은 종래부터 말뚝두부의 모멘트를 간편하게 구하기 위해서 쓰여지고 있으나 명확한 근거는 없다. 본 논문에서는 잔교식 안벽의 해석시 널리 사용되는 가상고정점 및 제1부동점을 이용한 해석 방법과 Winkler 이론에 근거한 지반탄성스프링모델을 적용한 3차원 동적해석과의 비교검토를 수행하였다.

### 2. Approximate Depth of Pile Supported

#### 2.1 Approximate Depth of Supported (I)

현재 연직 말뚝식 잔교의 해법에 사용되는 말뚝의

횡저항 계산은 지표면이 수평인 조건에 한정되어 있다. 따라서 사면에 시공되는 잔교 말뚝의 횡저항을 계산하는 경우에는 이에 대한 보정이 필요하다. 말뚝의 횡저항이나 지지력 계산에 있어서 각 말뚝의 가상지표면은 각 말뚝 축선상에서 전면수심과 실경사면의 1/2높이로 가정한다. 해저지반 속에 고정점을 가정하여 라멘 구조로 계산할 경우에는 말뚝의 가상고정점을 가상지표면아래  $1/\beta$ 로 산정한다(Fig. 1 항만 및 어항설계기준, 2005 해양수산부).

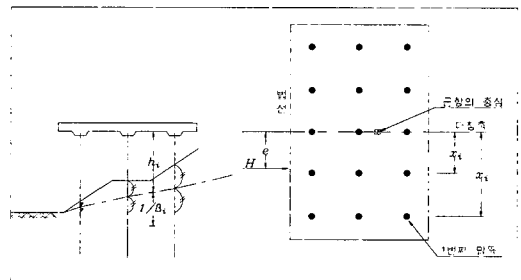


Fig. 1. 가상지표면의 산정방법

여기서,  $\beta$ 는 말뚝의 특성치로서 다음의 식(1)에 의해서 결정된다.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_h D}{4EI}} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (1)$$

- 1 (주)한국종합기술 항만부 과장.
- 2 (주)한국종합기술 항만부 이사.
- 3 (주)평원엔지니어링 이사, 공학박사.
- 4 (주)젠택 엔지니어링 대표이사

가상고정점법은 지반을 탄성스프링으로 가정하여 계산한 결과와 동일한 말뚝머리의 반력(Reaction stress)과 휨모멘트(Bending moment)가 발생하도록 지반내의 고정점을 결정하여 다른 나머지 지반의 효과를 무시하고 말뚝을 설계하는 방법이다. 흙의 횡방향 지반반력계수( $K_h$ )는 다음의 식(2)에서 제시하고 있다 (항만 및 어항설계기준, 2005 해양수산부).

$$K_h = 0.15N \quad (2)$$

## 2.2 Approximate Depth of Supported(Ⅱ)

Chang(1937)의 이론을 근거로한 가상고정점 산정 방법은 축직각방향에 외력이 작용하는 말뚝의 거동을 해석적으로 추정하는 방법으로 말뚝을 탄성보로 간주해서 해석하는 방법이다.

말뚝의 두부구속조건(Pile Head Condition)에 따른 돌출형태를 4가지로 구분하여서, 두부자유 말뚝의 휨모멘트 제1영점 깊이 혹은 두부고정 말뚝의 휨모멘트 제2영점의 깊이를  $l_{m1}$ 으로 표기하고, 다음의 식(3),(4),(5),(6)들로부터 구한다. 또한 말뚝의 근입길이가  $3\beta$ 이상이면 무한길이로 가정하고 계산한다.

○ 두부자유말뚝 ( $h=0$ )일 경우,

$$l_{m1} = \frac{\pi}{\beta} \quad (3)$$

○ 두부자유말뚝 ( $h>0$ )일 경우,

$$l_{m1} = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{-\beta h}{1 + \beta h} \quad (4)$$

○ 두부고정말뚝 ( $h=0$ )일 경우,

$$l_{m1} = \frac{5\pi}{4\beta} \quad (5)$$

○ 두부고정말뚝 ( $h>0$ )일 경우,

$$l_{m1} = \frac{1}{\beta} \left( \tan^{-1} \frac{1 - \beta h}{1 + \beta h} + \pi \right) \quad (6)$$

Chang에 의한 방법은 지반의 탄성계수( $E_s$ , Elastic modulus)를 일정하다고 가정하고 이들의 일반식으로부터 경계조건을 적용한 공식들이다(항만 및 어항설계기준, 2005 해양수산부).

## 3. Lateral Subgrade Reaction Modulus

지반의 수평지반반력계수( $k_h$ )를 결정하기 위한 방법에는 식(2)에 의한 것 이외에 말뚝의 수평재하시험, 평판재하시험, 그리고 경험적 제안식에 의한 방법들이 있다. 본 사례에서는 해상에서의 재하시험에 대한 시간적 여유가 부족한 경우를 고려하여 현장시험을 수행하기 힘들 경우 경험적 제안식들을 이용하였다.

### 3.1 Propose $k_h$ by Empirical Methods

사질토 지반에서 수평력을 받는 말뚝의 수평지반반력계수를 심도별 N치의 변화를 고려하여 0.15N, Terzaghi(1956), Hukuoka, Yokoyama chart(JSCE), 도로교표준시방서(1996) 등의 제안식으로 산정한 결과 Table 1과 같다.

## 4. Numerical Analysis(FEM)

### 4.1 Structure Condition & Modeling(FEM)

본 검토에서는 직항식 횡간교를 대상으로 수치해석을 수행하였으며, 잔교식 안벽의 단면과 제원은 Fig. 2 와 Table 2와 같다.

Table 2. 잔교식 안벽의 제원

| 구분   | 제원      | 비고            |
|------|---------|---------------|
| 상부구조 | RC SLAB | $t=1.2m$      |
| 하부구조 | PILE 기초 | $\phi=1200mm$ |

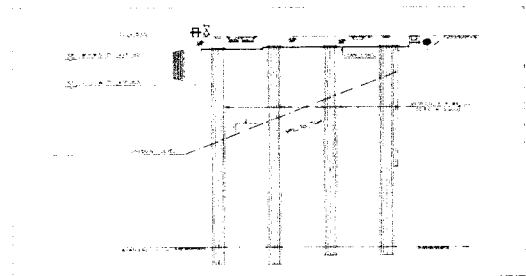


Fig. 2. 잔교식 안벽의 해석단면

Table 1. Lateral Subgrade Reaction Modulus by Empirical Methods ( $k_h$ , kg/cm<sup>2</sup>) &  $1/\beta$

| N  | 0.15N | Terzaghi | Hukuoka | JSCE  | 도로교표준시방서<br>( $E_o=12N$ 적용) | $1/\beta(m)$ |
|----|-------|----------|---------|-------|-----------------------------|--------------|
| 6  | 0.900 | 1.838    | 1.430   | 1.200 | 0.395                       | 8.867        |
| 10 | 1.500 | 3.675    | 1.760   | 2.000 | 0.693                       | 7.799        |
| 12 | 1.800 | 4.083    | 1.895   | 2.400 | 0.848                       | 7.539        |
| 15 | 2.250 | 5.513    | 2.075   | 3.000 | 1.083                       | 7.113        |
| 28 | 4.200 | 8.575    | 2.673   | 5.600 | 2.152                       | 6.260        |

해석방법은 고정단 해석 모델링(가상고정점법 및 제1부동점법)과 지반스프링 해석모델링(경사지반 반영조건에 따른 2가지모델)을 적용하여 구조물의 정적 해석뿐만 아니라 동적해석에도 널리 사용되고 있는 상용 유한요소 해석프로그램인 Midas Civil 2006 을 이용하여 각각 해석 하였다(Fig. 3, Fig. 4).

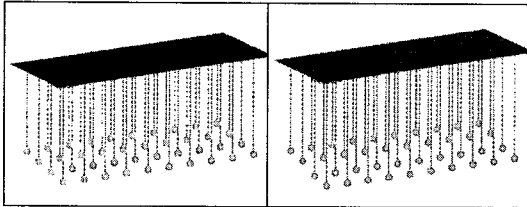


Fig. 3. 고정단 해석모델링

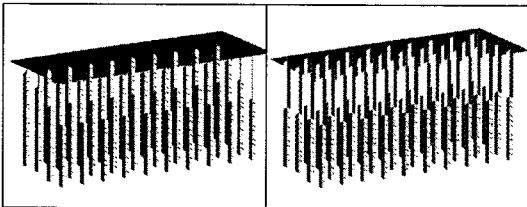


Fig. 4. 지반스프링 해석모델링

지반스프링 모델은 잔교전면 경사지반에 대하여 가상지표면의 스프링 모델링과 집중질량(Lumped mass)모델링으로 하였다.

#### 4.2 Ground Condition & $k_b$

본 사례지역은 말레이시아 Johor Baru 동쪽 약 40km 떨어진 곳의 Pasir Gudang 산업단지에 위치한 종합 조선소로서, 검토대상 안벽지역의 지반조사 결과에 따른 지층분포형태 및 대표 N값에 따른 수평지반반력계수는 Fig. 5와 같다.

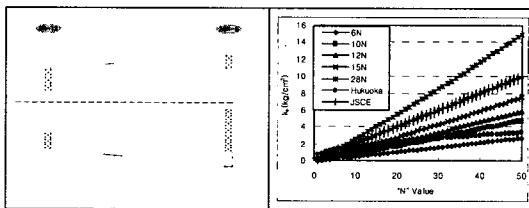


Fig. 5. 지반조건 및 수평지반반력계수

현재 육상상태로 시공 후 전면준설(Dredging)에 의한 잔교(Landing Pier) 구조물로 계획되었다.

#### 4.3 Dynamic Analysis Condition

동적해석조건은 Fig. 6에서와 같이 Johor Baru 지역의 최대관측강도(Maximum Intensity Observed)와 최대가속도(Maximum Acceleration)를 이용하여 Euro Function(1996)에 의한 표준설계응답스펙트럼을 작성하여 해석에 적용하였다.

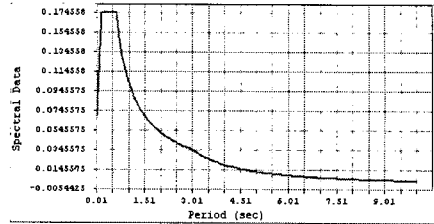


Fig. 6. 표준설계응답스펙트럼

### 5. RESULTS

잔교식 안벽의 내진설계시 말뚝기초의 고정 및 지반스프링을 고려한 3차원 응답스펙트럼 해석결과 각각의 해석방법에 의한 질량참여율 및 고유주기 결과는 Table 3 및 Fig. 7과 같이 95%이상의 질량참여율을 보이며, 동일한 대상에 대하여 다른 해석 모델링을 하였을 경우 각 모드별 고유주기가 차이가 나는 것을 알 수 있다. 전반적으로 지반스프링 해석의 경우가 고정점해석에 의한 결과보다 저차모드에서 작은 값의 고유주기를 나타내고 있다.

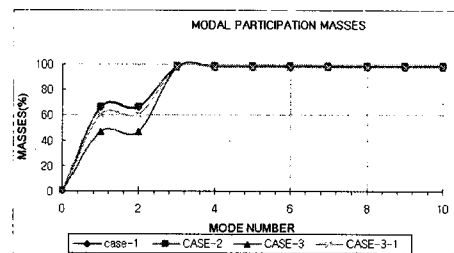


Fig. 7. 해석별 질량참여율

Table 3. 해석별 고유주기의 결과비교

| Mode     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| case-1   | 1.622 | 1.572 | 1.451 | 0.141 | 0.137 |
| case-2   | 1.808 | 1.742 | 1.588 | 0.147 | 0.142 |
| case-3   | 1.432 | 1.291 | 1.174 | 0.148 | 0.143 |
| case-3-1 | 1.537 | 1.470 | 1.356 | 0.147 | 0.143 |

Table 4에서 최대부재력 산정결과 고정단 모델과 스프링 모델의 부재력이 거의 유사한 것으로 나타났다. 이것은 육상시공 조건에 의한 기초지반이 양호하기 때문이다. 또한, 집중질량 모델링법에 의한 해석결과

가 더 일치함을 보이고 있어 경사지반에 대한 모델링 표현에 적절하다.

Table 4. 최대부재력의 결과비교

| 해석조건          | 작용방향 | 축력     | 전단력    | 모멘트    |
|---------------|------|--------|--------|--------|
| case1/case3   | 교축   | 1.2578 | 0.6657 | 0.9397 |
|               | 교직   | 1.5061 | 0.6830 | 0.9438 |
| case2/case3   | 교축   | 1.2536 | 0.6294 | 0.9102 |
|               | 교직   | 1.5058 | 0.6268 | 0.9414 |
| case1/case3-1 | 교축   | 1.2834 | 0.9387 | 1.0910 |
|               | 교직   | 1.3322 | 0.9520 | 1.1049 |
| case2/case3-1 | 교축   | 1.2790 | 0.8876 | 1.0567 |
|               | 교직   | 1.3319 | 0.8737 | 1.1020 |

지반스프링을 이용한 모델링은 Winkler 이론에 근거한 것으로서 지반의 반력을 절점의 스프링으로 대체하였으므로 고정점 모델링 해석과 비교하여 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

특히, 저차모드에서 차이가 발생되어 단일모드 스펙트럼해석과 같은 단순화된 방법을 사용하여 설계를 하였을 경우 더욱 큰 차이를 발생시킬 가능성이 있다.

지반스프링 모델링은 지반의 특성을 탄성의 스프링으로 고려하는 것으로 지반의 효과를 완벽하게 고려할 수 있는 방법은 아닐지라도 동적인 문제에 있어서는 고정점을 이용한 모델링 보다는 합리적인 해석이다.

잔교식 안벽을 설계할 때에는 이의 영향을 적절히 고려하여야 할 것이다.

## 6. CONCLUSION

말뚝으로 지지되는 잔교식 안벽의 설계는 중요도에 따라 1등급 및 2등급, 내진성능 수준에 따라 기능수행수준과 붕괴방지구준으로 구분하여 적절한 해석방법을 사용한다(해양수산부, 1999). 내진해석 방

법으로는 구조물에 작용하는 지진력에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중에 비례하는 임의의 수평력 또는 수직력을 지진하중으로 재하하여 정적 해석을 수행하는 등가정적해석법과 응답스펙트럼법 및 시간이력해석법이 있으며, 본 사례에서는 응답스펙트럼법을 이용한 동적해석을 수행하였다.

상부구조물의 내진해석(Seismic Anlsys)시 모델링의 편의를 위하여 기초면을 고정단으로 모델링하고, 기초지반에 대한 연성을 반영하지 않고, 지진하중으로 표준설계응답스펙트럼을 입력하여 해석하는 것이 일반적이다. 이러한 설계방법은 기초지반의 연성을 고려할 때보다 지진하중에 의한 구조물의 강성이 크게 산정되므로 보수적인 설계방법으로 알려져 있으며, 자칫 비경제적인 설계 방향으로 수행될 가능성이 높다. 그러므로 기초지반에 대한 연성을 고려하여 모델링하면 과대설계로 인한 경제적 손실과 지반특성에 따라 발생할 수도 있는 불안전측의 설계를 미연에 방지할 수 있을 것이라 판단된다.

또한, 항만 및 어항의 내진설계표준서(해양수산부, 1999)에 의하면 장주기 성분이 우세한 실제 지진과 단주기 성분이 우세한 실제 지진 및 현지 지반조건을 반영한 인공지진 등 최소 3가지 이상을 설계조건에 맞도록 보정하여 사용토록 제시하고 있으며, 차후에 보다 정밀하고 경제적인 안벽설계를 위한 과제로 남아있다.

## REFERENCES

- 해양수산부(1999). 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서.
- 해양수산부(2005). 항만 및 어항설계기준.
- 한국지반공학회(2006). 지반구조물의 내진설계.
- American Society of Civil Engineers, Seismic Guidelines for Ports, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 12, 1998.