슬래브궤도 하부의 마이크로파일 설치효과 수치해석
Numerical analyses on the effects of micro pile installation beneath slab tracks

이수형* 김대상* 이일화[1] 정충기[2]
Su-Hyung Lee Dae-Sang Kim Il-Wha Lee Choong-Ki Chung

ABSTRACT

The bending moment and settlement of the slab track can be reduced by the installation of small numbers of micro piles beneath the track. This paper presents the effect of micro pile installation on the reduction of bending moment and settlement of slab track, estimated by a numerical method. The slab track is modeled as a plate based on the Mindlin's plate theory, and soil and piles are modeled as Winkler and coupled springs, respectively. The stiffness of piles is obtained by the approximate analytical method proposed by Randolph and Wroth, and the modulus of subgrade reaction is adopted to evaluate Winkler spring constant. From the analysis results, the effect of the micro pile installation is significant to considerably reduce the settlement of slab track. However, for the proper reduction of bending moments in a slab track, the pile arrangement should be reasonably taken into account to prevent the stress concentration at pile location.

1. 서 론

슬래브 궤도의 경우 대체로 지지력은 확보되나 하부 지반 조건이 비교적 연약한 경우 열차하중에 따른 과도한 휨모멘트 또는 부등침하가 발생할 수 있으며, 이를 억제하기 위한 슬래브 두께의 증가가 필요하게 된다. 최근 전면기초만으로도 충분한 지지력이 확보되지만 과도한 침하량이나 휨모멘트가 예측되는 경우 소수의 파일을 설치하여 침하량과 휨모멘트를 효과적으로 감소시키는 piled raft 기초 개념의 파일 사용이 증대되고 있다. 따라서 이러한 개념을 적용하여 궤도 하부에 소수의 마이크로 파일을 설치하면 슬래브 궤도에 발생하는 부등침하 및 휨모멘트를 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 Lee 등(1998)에 의해 개발된 해석기법을 적용하여 하부에 소수의 마이크로파일이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우에 대하여 슬래브궤도의 거동을 해석하였다. 상부슬래브에 대해서는 유한요소, 파일에 대하여 근사적 탄성해, 지반에 대해서는 지반반력계수를 적용한 Winkler 스프링으로 모델링하는 해석 기법을 적용하였다. 해석 결과를 비교 분석함으로써 마이크로 파일의 적용을 통한 슬라브궤도에 발생하는 휨모멘트 및 부등침하량의 감소 효과를 평가하였다.

---

1 한국철도기술연구원 선임연구원
2 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

2. 해석 기법

Lee 등(1998)은 연직하중 재하 시 파일과 상부전면기초(raft 또는 slab)의 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 piled raft 해석 기법을 개발하였다. Piled raft 시스템은 raft와 파일 그리고 지반으로 구성된 기초 형식이다. Raft는 상부 구조물의 하중을 파일과 지반에 분산시키고, 지반과 파일은 상부에서 전달되는 하중을 지지한다. Raft의 두께는 다른 쪽 치수에 비하여 작기 때문에 판으로 이상화할 수 있다. Raft는 일반적으로 콘크리트로 시공되며, 또한 외부 하중을 각 파일과 지반에 균등히 분산시키기 위하여 판의 두께가 상당히 두꺼우므로 전단 변형을 고려하는 Mindlin 판 이론을 적용시켜 해석한다. 지반은 Winkler 스프링으로 이상화하며, 파일은 Randolph와 Wroth(1978)이 제안한 근사적 탄성해법을 적용하여 단일 스프링 모델을 적용한 단일 스프링으로 모델링하고 파일 사이의 상호작용은 Randolph와 Wroth(1979)가 제안한 변위장 중첩의 원리를 적용하여 고려한다(그림 1).

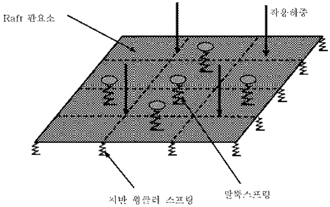


그림 1. piled raft 시스템의 모델링

지반의 스프링 강성(K_s)은 Vesic (1961)이 제안한 지반반력계수를 이용하여 산정한다.

$$K_s = \frac{2G_s}{B(1-\nu_s)^2}$$

여기서 G, B, n_s 는 각각 지반의 전단탄성계수, raft의 폭 그리고 지반의 포아송비이다.

파일의 스프링강성(K_p)을 구하기 위하여 Randolph와 Wroth (1978)가 제안한 근사적 탄성해법을 사용한다. 이 방법에서는 지반을 전단강성이 깊이에 따라 선형으로 변화하고 포아송비는 일정한 탄성연속체로 가정하고 파일 주위의 지반을 파일 선단부를 경계로 하여 두 층으로 나누어 고려한다. 상부층인 파일 주변부 지반 변형에 대하여는 원통형 전단 변형에 대한 탄성해를 적용하고 하부층인 파일 선단부 지반의 변형에 대해서는 강성 편치의 관입에 대한 탄성해를 적용한다. 두 층간의 변위 적합조건과 파일의 압축성을 근사적으로 고려하여 파일의 강성을 아래와 같은 closed-from의 근사식으로 정의할 수 있다.

$$K_p = \tilde{G}_s r_0 \left\{ \frac{4}{1-\nu_s} + \frac{\rho 2\pi l \tanh(b)}{r_0} b \ln(r_m/r_0) \right\} \left\{ 1 + \frac{4l \tanh(b)}{r_0 b(1-\nu_s)\pi\lambda} \right\}^{-1}$$

여기서, l, r_0 , r_m은 파일의 길이, 반경 그리고 영향 반경이며, $\rho = \tilde{G}_s / \overline{G_s}$ 로 파일의 중간 깊이에

서 지반의 전단탄성계수 ($\widetilde{G}_s$) 와 파일 선단에서 지반의 전단탄성계수 ($\widetilde{G}_s$)의 비로 비균질성 지반을 고려하기 위한 것이다. E_p는 파일 재료의 탄성계수이며, $\lambda = E_p/G_l$로 파일 재료와 지반의 강성비를 나타낸다. 로 파일의 압축성을 나타낸다. 파일의 영향 반경은 파일에

의해 발생하는 변위가 전파되는 한계범위를 나타내는 것으로, 수치해석을 이용한 parametric study를 통해 지반의 비균질성 정도와 포아송비, 그리고 파일 길이의 함수로서 깊이에 대한 평균값을 산정하게 된다(Randolph와 Wroth, 1979).

3. 해석 조건

3.1 지반 및 슬래브 조건

해석에 사용된 슬래브, 마이크로파일 및 지반의 물성치는 일반적인 값을 사용하였으며 표 1에 정리하여 나타내었다. 지반조건은 탄성계수 20 MPa의 비교적 연약한 지반 조건을 가정하였다.

표 1. 해석에 사용된 입력 물성치

슬래브	파일	지반
크기 : 3.0m×5.0m 두께 : 27cm 탄성계수 : 35GPa 포아송비 : 0.167	지름 : 30cm 길이 : 5.0m 탄성계수 : 35GPa	탄성계수 : 20MPa 포아송비 : 0.4

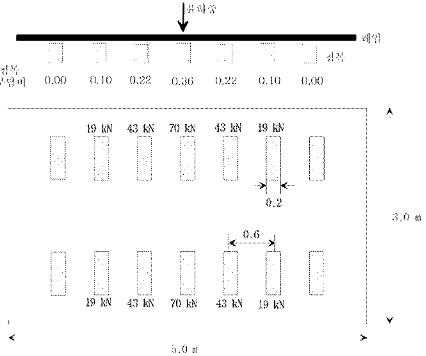


그림 2. 윤하중의 침목분담비 및 등분포 하중 위치

3.2 하중 재하 조건

축하중 220kN이 작용한다고 가정하였으며, 윤하중은 축하중의 1/2을 사용하였다. 속도충격율은 설계속도 200km/hr에 대하여 일본에서 사용하는 속도충격율 산정 공식을 이용하였다. 또한 캔트부족량에 대한 하중의 증가분을 고려하여 아래와 같이 윤중(P_w')을 산정하였다.

$$P_w' = P_w \times i \times (1+c) = 11 \times 1.6 \times 1.1 = 193.6 \text{ kN}$$

여기서, 속도충격율(i) = 1.0 + 0.3 (설계속도/100) = 1.6

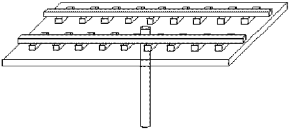
캔트부족량(c) = 0.1

산정된 윤중은 Selig와 Waters(1994)의 침목별 분담하중에 대한 해석 결과를 참조하여 그림 2와 같은 비율로 각 6짱의 침목에 분담되는 것으로 가정하였으며, 각 분담하중을 침목의 면적으로 나눈 등분포 하중을 침목이 위치하는 부분에 작용시켰다.

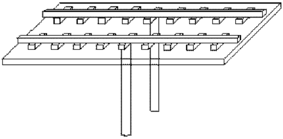
현재 적용된 해석 기법에서는 기존의 연구결과를 토대로 윤중에 대한 침목 분담비를 가정하였으나, 실제로는 파일의 설치에 따라 침목 분담비도 변화한다. 이러한 문제점의 해결을 위해서는 추후 상부의 레일, 침목, 슬래브 및 하부의 지반, 파일을 통합하여 해석할 수 있는 기법의 개발이 요구된다.

3.3 파일의 개수 및 배치

그림 3에 나타낸 바와 같이, 한 개의 파일을 슬래브 가운데에 설치한 경우와, 두 개의 파일을 슬래브 가운데 위치한 침목 하부에 각각 설치한 두 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 또한 파일을 설치하지 않은 경우에 대한 해석도 수행하였다.



(a) 한 개의 파일을 설치한 경우



(b) 두 개의 파일을 설치한 경우

그림 3. 마이크로 파일의 배치

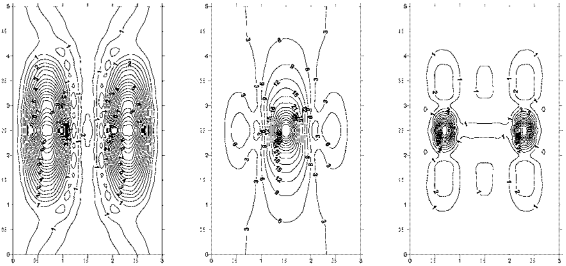
4. 해석 결과 및 분석

4.1 휨모멘트 분포

그림 4는 해석결과로 산정된 슬래브에 발생하는 휨모멘트 분포이다. 한 개의 파일을 중앙에 설치한 경우(그림 5b)는 파일이 설치된 위치에 상당한 크기의 휨모멘트가 발생하는 것으로 나타났다. 이 경우 파일 설치 위치에 대한 슬래브 두께의 증가가 요구되며, 휨모멘트의 감소만을 목적으로 한 파일 설치 효과는 기대하기 어려운 것으로 평가된다. 중앙 침목 하부에 파일을 두개 설치한 경우(그림 6b)는 파일이 설치된 위치를 제외한 다른 부분에서 전체적으로 휨모멘트가 고르게 분포하는 휨모멘트 감소 효과가 나타난 것으로 평가된다. 따라서 휨모멘트 감소 목적으로 파일을 설치하는 경우는 하중조건을 고려한 적절한 파일의 배치가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

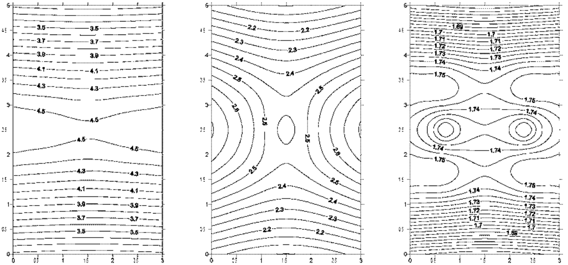
4.2 침하량 분포

그림 5는 해석결과로 산정된 슬래브에 발생하는 침하량 분포이다. 설치된 파일 개수의 증가에 따른 침하량 감소효과가 확연히 나타나고 있으며, 최대 침하량은 파일이 설치되지 않은 경우(그림 5a)와 비교 할 때, 파일이 하나 설치된 경우(그림 5b)는 41%, 파일이 두개 설치된 경우(그림 5c)는 62% 감소하였다. 부등침하량의 감소 효과는 더욱 탁월하여, 파일이 설치되지 않은 경우와 비교 할 때, 파일이 하나 설치된 경우와 두개 설치된 경우 각각 54%, 94% 씩 감소하였다. 따라서 침하량 감소 목적으로 한 파일의 설치 효과는 매우 큰 것으로 평가된다.



(a) 파일을 설치하지 않은 경우 (b) 한 개의 파일을 설치한 경우 (c) 두 개의 파일을 설치한 경우

그림 4. 휨모멘트 분포 (kN · m)



(a) 파일을 설치하지 않은경우 (b) 한 개의 파일을 설치한 경우 (c) 두 개의 파일을 설치한 경우

그림 5. 침하량 분포 (mm)

5. 결 론

본 논문에서는 파일 및 지반에 대한 근사적인 탄성해와 슬래브에 대한 유한요소해석을 결합한 수치해석 기법을 적용하여 마이크로파일의 설치가 슬래브 궤도의 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 파일의 설치로 인한 침하량 감소효과는 탁월하였으며, 소구경 파일을 하나만 설치하더라도 전체 침하량 및 부등침하량이 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 슬래브에 발생하는 부재력의 경우는 파일의 배치에 영향을 받았으며, 파일 두 개를 침목 하부에 설치한 경우는 휨모멘트가 전체적으로 균일하게 감소하는 효과를 나타내었으나, 중앙부에 파일 한 개를 설치한 경우는 파일 설치 위치에 상당한 크기의 휨모멘트 및 전단력이 집중 되는 것으로 나타났다. 따라서 슬래브 부재력 감소 목적으로 파일을 설치하는 경우에는 파일 배치에 대한 합리적인 고려가 필요한 것으로 평가되었다.

현재 적용된 해석 기법에서는 윤중에 대한 침목 분담비를 가정을 통해 슬래브, 지반, 파일만을 통합하여 해석하였으나, 마이크로파일 설치효과에 대한 보다 합리적인 평가를 위해서는 향후 레일, 침목, 슬래브를 포함한 궤도 상부구조와 하부 지반 및 파일을 통합하여 해석할 수 있는 수치해석 기법의 개발이 요구된다. 또한 지반조건, 파일배치, 파일 제원 등의 영향에 대한 보다 심층적인 연구가 이루어진다면, 마이크로파일의 설치를 통한 합리적이고 경제적인 슬래브궤도의 설계 및 시공이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Lee, S-H., Chung, C-K., Lee, H-S., Kim, M-M. and Lee, S-H. (1999). "Simplified numerical anaysis of piled raft foundation," Proceedings of the 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Poster session proceedings, pp.63-64
2. Randolph, M. F. and Wroth, C. P. (1978). "An Analysis of the deformation of vertically loaded piles," ASCE :Journal of the Geotechnical Engineering, Vol. 104, GT12, pp.1465-1488
3. Randolph, M. F. and Wroth, C. P. (1979). "An Analysis of the vertical deformation of pile Groups," Géotechnique 29, No.4, pp.423-439
4. Selig, E. T. and Waters, J. M (1994), "Track Geotechnology and Substructure Management", Thomas Telford
5. Vesic, A. S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sands. Performance on Deep Foundation, ASTM STP444, pp.177-222.