

## 말뚝 설치를 통한 콘크리트궤도의 누적소성침하 감소 효과

### The Effects of Pile Installation on the Reduction of Cumulative Plastic Settlements

이 수 형<sup>1</sup> Lee, Su-Hyung

이 일 화<sup>2</sup> Lee, Il-Wha

이 성 진<sup>2</sup> Lee, Sung-Jin

김 대 상<sup>2</sup> Kim, Dae-Sang

#### Abstract

An active application of concrete track is being expected for the future constructions of Korean railroad. In comparison with the existing ballasted track, a concrete track is very susceptible for the settlement, since its rehabilitation requires much time and cost. When a concrete track is constructed on fine-grained subgrade soil, excessive cumulative plastic settlements due to repetitive train road may occur. In this case, the settlement of the concrete track may be effectively reduced by installing a small number of small-diameter piles beneath the track. This paper presents the effect of pile installation on the reduction of cumulative plastic settlement of concrete track. A method combining experiential equation and numerical method is proposed. Using an existing experiential equation and the estimated earth pressure distribution, the cumulative plastic strain was calculated. From the results, it is verified that the effects of the pile installation is significant to effectively reduce the cumulative plastic settlement of concrete track. The reduction effects of the cumulative plastic settlement according to the pile number and pile arrangement are presented.

#### 요 지

향후 국내 철도 건설에는 콘크리트궤도의 활발한 적용이 예상된다. 콘크리트궤도의 경우 기존의 자갈도상 궤도에 비해 침하로 인한 사용성 저하가 크고 그 복구가 어렵기 때문에, 침하에 대한 보다 엄격한 대처가 요구된다. 특히 반복되는 열차하중에 의해 발생하는 소성변형의 축적에 의한 장기 침하를 예측하는 것은 철도 궤도의 합리적인 설계와 유지관리를 위해 필수적이다. 세립토로 구성된 연약한 노반 위에 설치되어 과도한 누적소성침하가 예상되는 경우, 소수의 소구경 말뚝을 설치하면 침하를 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 예측된다. 본 논문은 경험식과 수치해석을 결합한 방법을 통해 말뚝 설치에 의한 누적소성침하량의 감소 효과를 평가하였다. 본 논문에서는 3차원 유한차분법을 이용하여 말뚝이 설치된 콘크리트궤도를 모델링하여 열차하중에 의해 발생하는 지중응력 상태를 파악하고, 산정된 응력 분포를 소성변형 예측을 위한 경험식에 적용함으로써 콘크리트궤도에서 발생하는 장기 소성침하를 예측하였다. 해석 결과의 분석을 통해 누적소성침하량의 감소 목적으로서의 말뚝 설치 효과를 확인하였다. 또한 말뚝 설치개수 및 말뚝 배치에 따른 누적소성침하 감소 특성을 제시하고 누적소성침하 감소를 위한 효과적인 말뚝 배치를 제안하였다.

**Keywords :** Concrete track, Cumulative plastic settlement, Experiential equation, Fine-grained subgrade, Finite difference method, Pile

1 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Track and Civil Eng. Dept., Korea Railroad Research Institute, geoxlee@krrri.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Track and Civil Eng. Dept., Korea Railroad Research Institute)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

경부고속철도 2단계, 호남고속철도 등의 향후 철도 건설에는 콘크리트궤도의 본격적인 적용이 예상된다. 콘크리트궤도의 경우 기존의 자갈도상 궤도에 비해 침하로 인한 사용성 저하가 매우 크고 그 복구가 어렵기 때문에 침하에 대한 보다 엄격한 대처가 요구된다. 특히 반복되는 열차하중에 의해 발생하는 소성변형의 누적에 의한 장기 침하를 억제하는 것은 철도 궤도의 합리적인 유지관리를 위해 필수적이다.

최근 전면기초만으로도 충분한 지지력이 확보되지만 과도한 침하 발생이 예측되는 경우 소수의 파일을 설치하여 침하량을 효과적으로 감소시키고자 하는 “piled raft 기초” 개념의 말뚝 사용 증대되고 있다. Burland 등(1977)이 처음으로 제안한 이러한 개념의 기초설계에서는 말뚝이 기초의 전체적인 지지력을 증대시키기 위한 목적 보다는 침하를 감소시킬 목적으로 주로 사용되며, 유럽지역을 중심으로 그 사용이 확대되고 있다. Piled raft 기초의 경우는 기존의 무리말뚝에 비해 소수의 말뚝이 사용되므로, 말뚝의 적절한 배치를 통해 효과적으로 침하량 감소를 시키는 것이 매우 중요하며, 이에 관련된 모형시험 및 수치해석을 통한 연구가 이루어져 왔다(Sommer et al., 1991; Randolph, 1994; Horikoshi & Randolph, 1996; 김홍택 등, 1999; Kim et. al., 2002). 일반적으로 콘크리트궤도가 연약한 지반에 설치되는 경우에도 열차하중에 대한 궤도 자체의 지지력이 문제가 되는 경우는 거의 없으며, 주로 허용치 이상의 과도한 침하가 문제가 되고 있다. 따라서 piled raft 기초의 개념을 철도 분야에 적용하여, 궤도 하부에 소수의 소구경 말뚝을 적절히 배치하여 설치하면 연약지반에 설치된 콘크리트궤도에 발생하는 침하를 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

일반적으로 탄성침하는 수치해석을 통해 비교적 정

확한 예측이 가능하지만, 반복하중에 의해 축적되는 소성침하의 경우는 현재까지 개발된 수치해석 기법을 통해서 정량적이고 실질적인 예측치를 얻기 어려운 상황이다. 따라서 지금까지 철도 궤도 하부의 장기 소성침하는 주로 반복 압축시험 또는 현장계측 결과를 토대로 제안된 경험식을 적용하여 예측되어 왔다. 이러한 경험식을 적용할 때 가장 주안점을 두어야 하는 부분은 소성변형을 일으키는 원인이 되는 열차하중에 의한 궤도 하부지반의 응력 상태를 정확하게 평가하는 것이다. 본 논문에서는 말뚝 설치로 인한 콘크리트궤도의 누적 소성침하감소 효과를 수치해석과 경험식을 결합한 방법을 통해 평가하였다. 말뚝이 설치된 콘크리트궤도의 해석을 위해 3차원 유한차분법을 이용하여 지반을 모델링하였으며, 말뚝과 콘크리트 슬래브는 유한요소로 모델링하였다. 수치해석을 통해 산정된 응력 분포를 Li와 Selig(1996)가 제안한 소성변형 예측을 위한 경험식에 적용함으로써 콘크리트궤도에서 발생하는 누적소성침하를 예측하였다. 또한, 지반 조건과 말뚝 배치를 변화시킨 parametric study를 수행하였으며, 지반 조건에 대해서는 노반하부 원지반의 강성을 변화 시켰고, 말뚝 배치에 대해서는 말뚝의 열수와 간격을 변화 시켰다. 해석 결과로 지반 조건과 말뚝배치의 변화에 따른 콘크리트궤도의 누적소성침하감소 효과를 제시하였다.

## 2. 고속철도 콘크리트궤도 형식

콘크리트궤도에는 다양한 형식이 있지만, 국내의 경우는 토공공간에 대하여 그림 1과 같은 형식으로 설치되고 있다. 이 형식의 콘크리트궤도에서는 강화노반 위에 도상강화층(HSB, Hydraulically Stabilized Basecourse)이 최소두께 300mm, 최소폭 3,800mm로 설치되고, 그 위에 궤도콘크리트층(TCL, Track Concrete Layer)이 최소 두께 240mm, 최소폭 3,200mm로 설치된다.

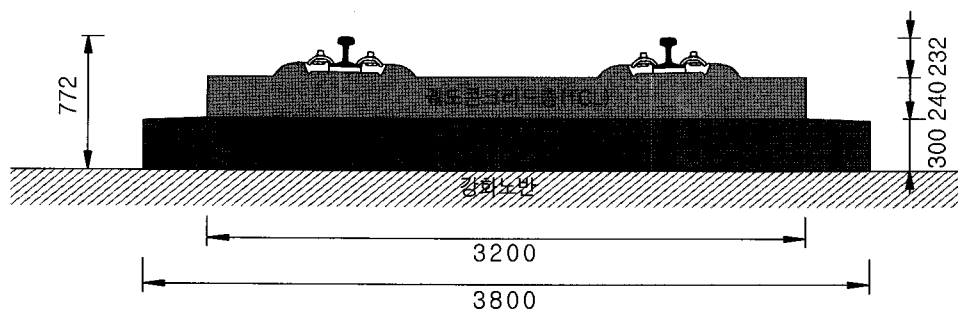


그림 1. 토공공간 콘크리트궤도 형식

표 1. 국내 고속철도 콘크리트궤도 노반의 다짐도 및 두께

강화 노반	보조도상층	$E_{v2} \geq 120\text{MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.2$ 두께 : 200mm
	입도 조정층	$E_{v2} \geq 80\text{MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$ 두께 : 300mm(툽기), 450mm(괘기)
상부노반	$E_{v2} \geq 80\text{MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$ 최대건조밀도의 95%이상	
하부노반	$E_{v2} \geq 60\text{MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.7$ 최대건조밀도의 90%이상	

콘크리트궤도의 하부에는 일정 강성과 두께를 갖는 강화노반이 설치된다. 강화노반은 노반의 상부에 강성이 큰 재료로 이루어진 층을 부설함으로써 상부노반의 변형을 최소화하기 위해 설치된다. 또한, 강화노반은 보조도상층과 입도조정층으로 나뉘며, 입도조정층은 상부노반이 입자가 큰 보조도상층으로 관입되는 것을 감소시키고 도상 표면의 침투수가 상부노반으로 유입하는 것을 차단하는 기능을 하게 된다.

강화노반의 재료로는 일본의 경우 쇄석, 아스팔트 콘크리트와 고로슬래그가 사용되고 있으나, 국내에서는 현재 입도 조정된 쇄석만을 사용하고 있다. 일반적으로 강화노반의 강성은 지반반력계수( $K_{30}$ ) 또는 재재하시의 탄성계수( $E_{v2}$ )를 이용하여 규정된다. 향후 국내 고속철도 콘크리트궤도의 토공구간에는  $E_{v2}$ 를 이용한 규정이 적용될 예정이며, 표 1에 나타난 바와 같이 재재하시의 탄성계수( $E_{v2}$ )와 초기 재하시 탄성계수( $E_{v1}$ )에 대한 재재하시 탄성계수 비( $E_{v2}/E_{v1}$ )를 이용하여 총 50cm~65cm의 층두께로 설계하도록 되어 있다. 강화노반의 하부에는 일정 강성(다짐도) 이상의 노반층을 조성하도록 규정하고 있다.

### 3. 해석 방법

#### 3.1 경험식을 이용한 누적소성침하 예측

포화토와 불포화토에 대한 삼축압축시험 또는 직접전단시험을 이용한 반복 압축시험 결과에 의하면 세립토 지반에서 반복하중에 의한 소성변형의 축적은 크게 세 가지 메커니즘에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 첫째는 소성 전단 변형, 둘째는 압밀, 셋째는 다짐에 의한 변형의 축적이다. 지금까지 반복하중에 의해 축적되는 소성변형율을 예측하기 위한 다양한 모델들(Hyde and Brown, 1976; Monismith 등, 1975; Baladi 등, 1983)이 개발되어 왔다. Li와 Selig(1996)는 실험결과와의 비

교분석을 통해 기존의 예측식들을 종합하여 평가하고, 개선된 소성변형율 예측식을 아래와 같이 제안하였다.

$$\epsilon_p = a \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b = \alpha \beta^m N^b \quad (1)$$

여기서,  $a$ ,  $m$ ,  $b$ 는 흙의 종류, 강도 상태, 축차응력 등에 따른 계수이며,  $N$ 은 하중 반복 횟수이며,  $\sigma_d$ 와  $\sigma_s$ 는 각각 지반 내 축차응력 및 흙의 정적 압축강도이다.

식 (1)은 많은 수의 반복압축실험 결과를 토대로 흙의 소성변형율에 영향을 미치는 중요한 요소로서 지반에 작용하는 축차응력, 흙의 정적강도, 반복응력의 횟수, 흙의 종류를 선택하여 유도된 것이다. 계수  $a$ ,  $m$ ,  $b$ 는 흙의 종류에 따라 결정되며, Li와 Selig(1996)가 제시한 대표적인 값은 표 1과 같다.

식 (1)에 사용된 변수 중에 가장 결정하기 어려운 것이 열차하중에 의해 지중에 발생하는 축차응력이며, 정확한 소성변형율 예측을 위해서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 하지만 지금까지는 탄성이론을 적용한 대략적인 축차응력의 예측이 이루어졌다. 특히 기존의 자갈도상궤도와 달리 복잡한 하중전달 방식에 의해 열차하중이 지중에 전달되는 콘크리트궤도의 경우는 단순한 탄성이론만을 적용하여 축차응력의 변화를 예측하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 탄소성모델을 적용한 3차원 유한차분해석을 이용하여 콘크리트궤도에서 열차하중에 의한 지중 축차응력을 산정함으로써 보다 정확하게 소성변형을 예측할 수 있는 기법을 제시하였다.

소성침하는 식 (1)에 의해 산정된 소성변형율을 토층 깊이에 따라 적분함으로써 구할 수 있다. 원지반을 적절한 두께의 여러 층으로 나누고 수치해석에서 산정된 축차응력 분포를 식 (1)에 적용하여 각 층의 평균 누적 소성변형율을 구하였으며, 깊이 5m까지 각 층의 소성변형율을 아래의 식 (2)를 이용하여 합산함으로써 콘크리트궤도 전체의 소성침하( $\rho$ )를 산정하였다.

$$\rho = \sum_{i=1}^n \epsilon_p^i h_i \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 층의 수,  $h_i$ 는 층깊이이다.

소성 침하 예측 시 하중 반복 횟수는 경부선 천안 조차원구간의 연간 통과톤수인 약 30MGT(Million Gross Ton)에 대하여 본 연구의 해석에서 적용한 2개의 축으로 이루어진 1대의 대차에 의한 하중 340kN(축중 170kN×2축)을 비교하여, 하중이 연간 약 900,000회 반복하여

작용한 것으로 환산하여 적용하였다.

### 3.2 말뚝이 설치된 콘크리트궤도의 수치해석 모델링

수치해석에는 Itasca Consulting Group, Inc.에서 개발한 상용 유한차분해석 프로그램인 *FLAC3D*(Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D) Version 2.0을 사용하였다. 그림 2에는 수치해석 모델의 모식도를 나타내었다. 원지반으로부터 3m 높이로 강화노반과 상부노반이 성토된 경우에 대하여 모델링 하였으며, 모델링의 범위는 일반적인 단선 궤도 폭과 대차 간격(한대의 대차에 의한 영향 범위)을 고려하여 폭 7.2m, 길이 18.2m로 결정하였다. 길이 18.2m의 궤도는 설치 간격이 0.65m인 29쌍의 레일 체결구를 포함한다. 궤도 하부의 노반 및 원지반은 깊이 15.0m까지 고려하였다. 원지반은 비교적 연약한 점성토 지반을 대상으로 하였으며, 12m 깊이까지 균질하게 분포하는 것으로 가정하였고, 폭은 90m로 성토 하

단부 폭(18m)의 5배가 되도록 하여 경계효과를 배제하고자 하였다. 경계조건으로는 4개의 옆면을 수평방향, 바닥면을 수직방향으로 각각 구속하였다. 그림 3은 말뚝을 1열, 10.4m 간격으로 설치한 경우의 중앙 단면에서의 하중재하 후 수직응력 분포로, 좌우 경계 부근에서 하중재하의 영향이 없는 정적지중하중 상태가 나타나므로 해석영역이 충분한 것으로 평가되었다.

지반에 대해서는 강화노반, 상부노반 및 원지반을 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 선형탄성-완전소성 재료로 모델링하였다. 노반층과 원지반의 두께 및 탄성계수는 표 1에 제시된 조건을 참조하여 결정하였으며, 강도는 일반적으로 사용되는 값을 적용하였다. 원지반의 강성에 대해서는 탄성계수를 10MPa, 20MPa, 30MPa, 40MPa의 4가지 경우로 변화시켰다. 표 2는 해석에 사용된 노반층 및 원지반층의 두께, 탄성계수 및 강도를 나타낸다.

콘크리트궤도에 대해서는 TCL층은 shell요소를 사용하여 크기 3.2m×18.2m, 두께 0.24m인 판으로 모델링하

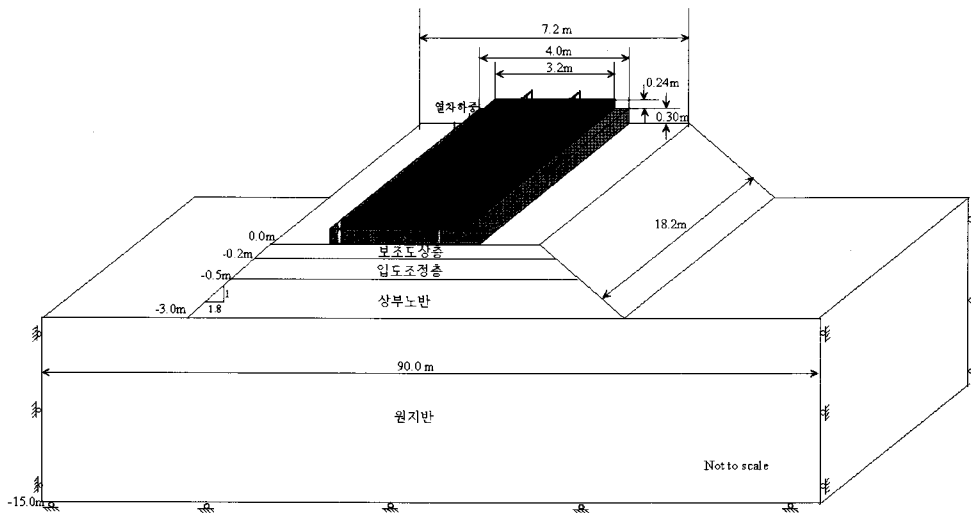


그림 2. 수치해석 모델 모식도

#### Contour of SZZ

##### Gradient Calculation

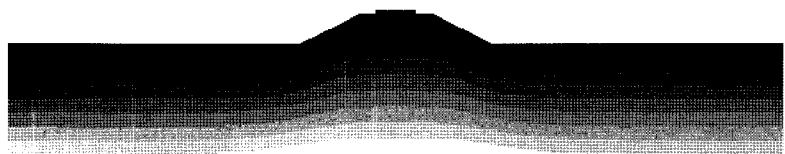
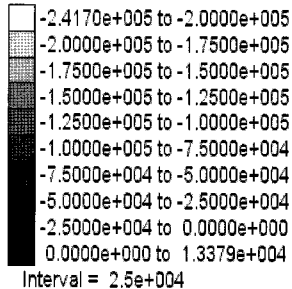


그림 3. 말뚝을 1열로 설치한 경우의 하중재하 후 수직응력 분포( $gf/m^2$ )

였고, HSB층은 크기 4.0m×18.2m, 두께 0.3m의 탄성연속체로 모델링하였다. 레일은 beam요소를 이용하여 모델링하였다. 레일패드는 수직방향으로 등가의 축강성을 갖는 beam요소로 모델링 하였으며, 이를 통해 레일의

beam요소와 TCL층의 shell요소가 연결되어 열차하중이 하부로 전달될 수 있도록 하였다. 궤도 재료의 물성치는 전형적인 값을 사용하였으며 표 3에 나타내었다. 그림 4에는 해석에 사용된 요소망을 나타내었으며 말뚝을 3열, 5.2m 간격으로 설치한 경우이다.

표 2. 흙의 종류에 따른 계수  $a$ ,  $m$ ,  $b$ 의 대표적인 값(Li와 Selig, 1996)

흙의 종류 (통일분류)	$a$	$b$	$m$
CH	1.2	0.18	2.4
CL	1.1	0.16	2.0
MH	0.84	0.13	2.0
ML	0.64	0.10	1.7

표 3. 노반 및 원지반의 물성치

층 물성	강화노반		상부노반	원지반
	보조도상층	입도조정층		
탄성계수	120MPa	80MPa	80MPa	10MPa~40MPa
포아송비	0.2	0.2	0.2	0.3
점착력	1.0kPa	1.0kPa	3.0kPa	10.0kPa
내부마찰각	35°	35°	32°	10°
두께	0.2m	0.3m	2.5m	12.0m

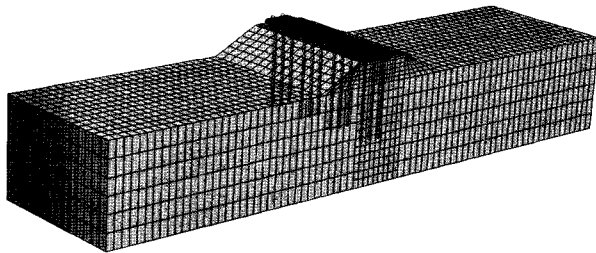


그림 4. 말뚝을 3열로 설치한 경우의 수치해석 요소망

### 3.3 하중 재하

작용하중으로는 고속열차 대차 1대의 주행하중을 정적 집중하중으로 환산하여 고려하였다. 열차하중의 동적 효과를 고려하여 산정되는 주행윤중( $P_d$ )은 정적윤중( $P_s$ )에 열차속도의 함수인 속도 충격률을 곱하여 구할 수 있다. 일반적으로 속도에 따른 충격계수는 열차속도를  $V$ 라고 하면, 장대레일에 대하여  $1+0.3V/100$ 를 적용한다. 설계속도 300km/hr에 대하여, 고속열차 축하중 170kN의 1/2인 85kN을 정적윤중으로 적용하면 아래의 식 (3)과 같이 주행윤중을 산정할 수 있다.

$$P_d = P_s \times (1 + 0.3V/100) = 85 \times \{1 + 0.3(300/100)\} = 161.5\text{kN} \quad (3)$$

결정된 주행윤중은 그림 2와 같이 경계영역 중앙의 레일 상부 네 지점에 차륜 종방향 간격이 2.6m인 두 쌍의 정적 집중하중으로 재하되었다.

### 3.4 말뚝 모델링 및 배치

#### 3.3.1 적용 말뚝의 특성 및 모델링

본 연구에서는 콘크리트 슬래브만으로도 지지력은

표 4. 궤도 재료 및 말뚝의 물성치

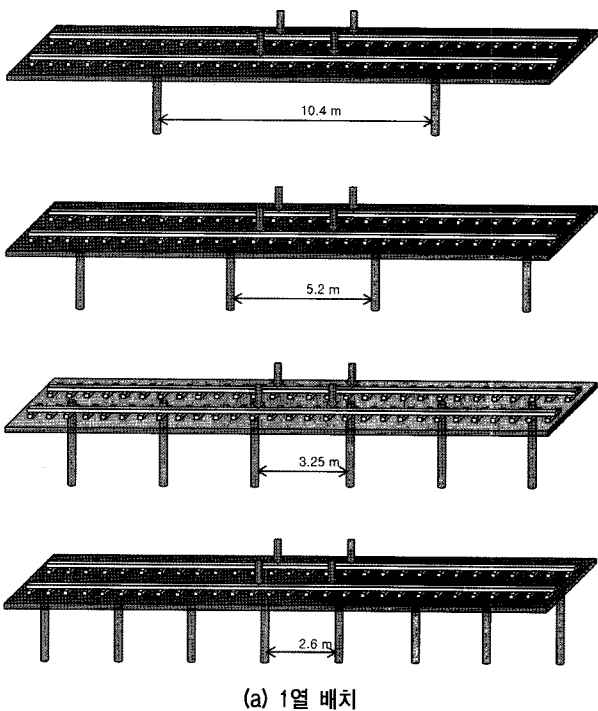
재료	모델	물성	값
레일	Beam 유한요소	탄성계수	210GPa
		포아송비	0.3
		단면적	$7.75 \times 10^{-3} \text{m}^2$
		단면2차모멘트	$3.09 \times 10^{-6} \text{m}^4$
레일패드	Beam 유한요소	축방향강성(레일패드강성)	$40 \times 10^3 \text{kN/m}$
TCL	Shell 유한요소	탄성계수	29.1GPa
		포아송비	0.2
		두께	0.24m
HSB	탄성연속체	탄성계수	10.0GPa
		포아송비	0.2
		두께	0.3m
말뚝	말뚝 유한요소	탄성계수	10.0GPa
		포아송비	0.2
		직경	0.3m

충분히 확보되나 과도한 침하가 예상되는 경우 침하량 감소 목적으로써의 말뚝 설치 효과를 평가하고자 하였다. 따라서 말뚝 선단이 단단한 지반에 안치된 선단지지 말뚝이 아닌 주변마찰력에 의해 대부분의 하중을 지지하는 직경 30cm의 소구경 마찰말뚝을 대상으로 하였다. 이는 Tan 등(2004)이 매우 연약한 지반에 설치된 구조물에 대하여 짧은 마찰말뚝을 이용하여 효과적으로 침하를 억제한 예와 같이, 침하량 감소 목적의 말뚝 사용에 관련된 piled raft 기초의 기본 개념을 따른 것이다.

말뚝은 *FLAC3D*에 내장된 말뚝요소를 이용하여 모델링 하였다. 말뚝요소는 두개의 절점으로 이루어진 선형 유한요소이며, 각 절점에 부착된 전단 및 연직 스프링을 통해 주변 지반요소에 대한 상대변위와 전단항복을 고려할 수 있다. 모든 말뚝의 길이는 10m로, 각 말뚝은 50cm 길이의 20개의 말뚝요소를 사용하여 모델링하였다. 말뚝 요소의 각 절점에 부착된 전단스프링의 단위 길이당 스프링계수는 ITASCA(1997)에서 제시한 일반적인 값인  $11.3\text{GN/m}^2$ 을 적용하였으며, 말뚝과 지반사이의 부착력 및 마찰각은 각 층별로 지반 점착력과 내부 마찰각의 2/3 값을 적용하였다.

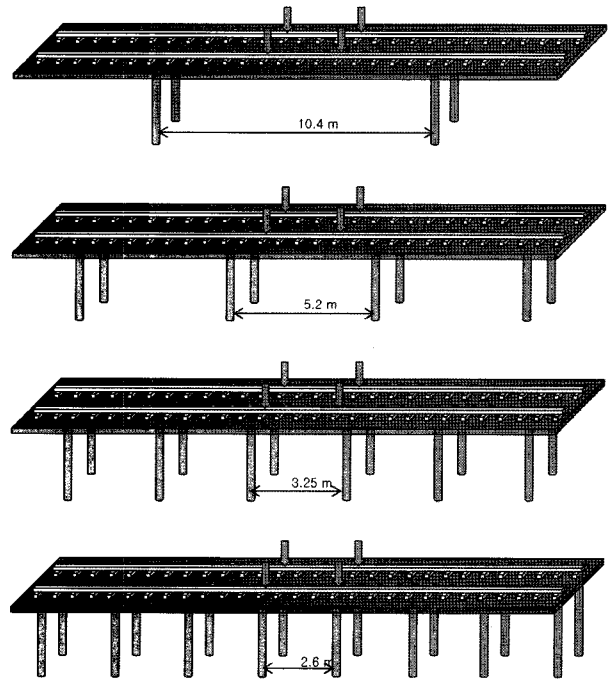
### 3.3.2 말뚝의 배치

다양한 말뚝 배치 형태에 따른 콘크리트궤도 침하거

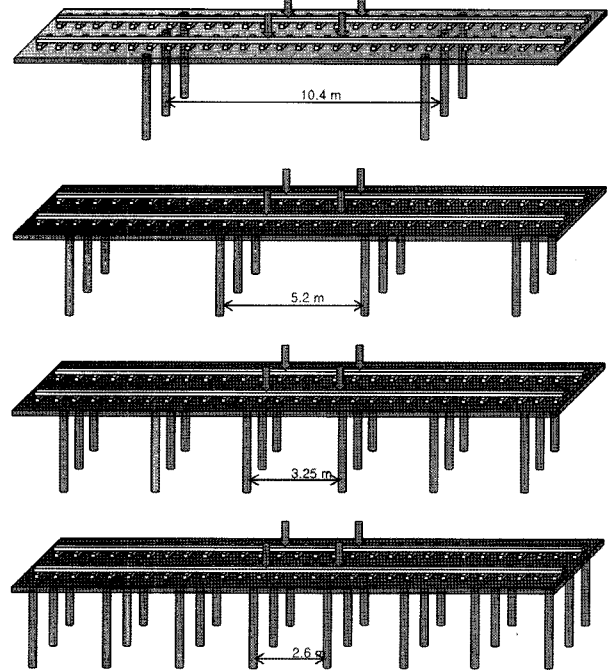


(a) 1열 배치  
그림 5. 말뚝 배치 형태

동의 변화를 검토하기 위해, 말뚝의 열수와 말뚝 간격을 변화시켜 해석을 수행하였다. 말뚝의 열수는 그림 5에 나타난 것과 같이 열차진행방향으로 말뚝을 1열, 2열, 3열로 배치하여 해석을 수행하였으며, 각각 1열로 설치된 경우는 궤도 중앙에, 2열로 설치된 경우는 레일 하부에, 3열로 설치된 경우는 궤도 중앙과 좌우 측변에 말뚝



(b) 2열 배치



(c) 3열 배치  
그림 5. 말뚝 배치 형태

열을 배치하였다.

말뚝열의 개수와 더불어 열차진행방향의 말뚝 간격도 변화 시켰으며, 종방향 말뚝 간격을 체결구 간격(0.65m)의 4배(2.6m), 5배(3.25m), 8배(5.2m), 16배(10.4m)로 변화시킨 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다.

즉, 말뚝 배치에 대해서는 그림 5에 나타난 바와 같이 말뚝열을 3종류로, 말뚝간격을 4종류로 변화시킨 12종류의 형태를 고려하였다.

### 3.4 지반조건

지반조건에 대해서는 원지반의 강성을 변화 시킨 해석을 수행하였으며, 강화노반 및 상부노반층은 표 2에 제시한 기준을 따라 시공되었다고 가정하였다. 상부하중에 의해 하부지반의 응력이 크게 증가하는 구조물 기초와 다르게 열차 하중을 받는 콘크리트 궤도의 경우는 원지반이 높은 응력수준에 이르지 않기 때문에 본 연구와 같은 선형탄성-완전소성 모델을 사용한 경우 원지반의 강도는 해석결과에 거의 영향을 미치지 못한다. 따라서 침하량 평가를 목적으로 하는 본 연구에서는 원지반의 강성만을 변화시킨 해석을 수행하였다. 원지반은 균질한 점성토 지반(CH)로 가정하였으며, 탄성계수를 10MPa, 20MPa, 30MPa, 40MPa 4종류로 변화 시켰다. Bowles (1988)가 제시한 전형적인 흙의 탄성계수 범위에 의하면 10MPa~40MPa의 탄성계수는 아주 연약한 점성토에서 중간정도 연약한 점성토의 범주에 해당한다.

## 4. 해석 결과

### 4.1 말뚝 설치개수에 따른 누적소성침하량의 변화

표 5는 해석결과로 산정된 반복 열차하중에 의한 콘크리트궤도의 10년경과 후의 누적소성침하량을 말뚝 간격 및 열수와 지반조건에 따라 정리하여 나타난 것이다. 그림 6은 말뚝 설치 개수에 따른 콘크리트 궤도의

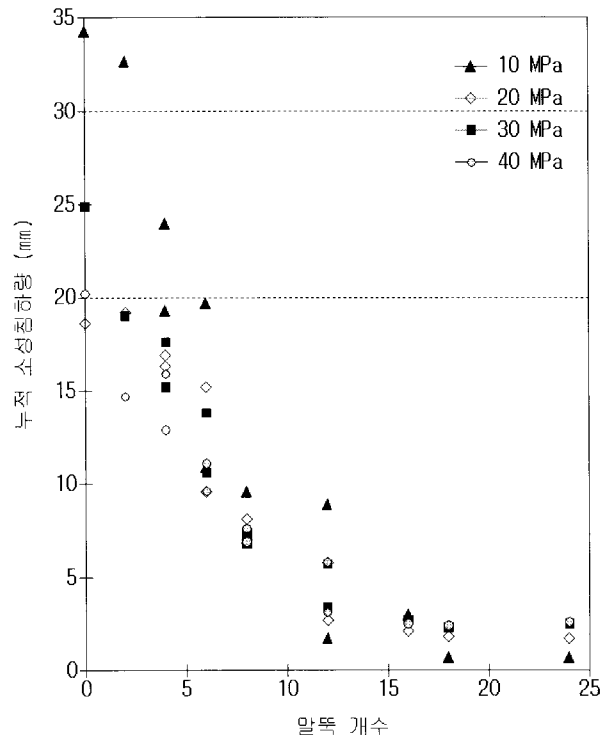


그림 6. 말뚝 설치 개수에 따른 누적소성침하량의 변화

표 5. 말뚝 배치 및 지반조건에 따른 누적소성침하량

말뚝열수	말뚝간격(m)	해석범위 내 말뚝개수	단위길이당 말뚝개수	원지반 강성에 따른 누적소성침하량(mm)			
				10MPa	20MPa	30MPa	40MPa
No pile	-	0	0	34.3	24.9	20.2	18.6
1열	10.4	2	0.11	32.7	19.2	19.0	14.7
	5.2	4	0.22	19.3	17.6	16.3	15.9
	3.25	6	0.33	10.9	9.6	10.6	9.6
	2.6	8	0.44	7.1	7.0	7.3	6.9
2열	10.4	4	0.22	24.0	16.9	15.2	12.9
	5.2	8	0.44	9.6	8.1	7.6	6.8
	3.25	12	0.66	1.7	2.7	3.4	3.1
	2.6	16	0.88	3.0	2.1	2.7	2.5
3열	10.4	6	0.33	19.7	15.2	13.8	11.1
	5.2	12	0.66	8.9	5.8	5.7	5.8
	3.25	18	0.99	0.7	1.8	2.3	2.4
	2.6	24	1.32	0.7	1.7	2.5	2.6

누적소성침하량의 변화를 나타내며, 여기서 말뚝 개수는 해석에서 고려한 궤도 길이 18.2m 범위에 설치된 총 말뚝 개수이다.

말뚝 설치 개수에 따른 누적소성침하량의 감소는 비선형적으로 나타나서, 그림 6에서 설치된 말뚝 개수가 1개에서 12개로 증가하는 경우는 말뚝개수가 증가함에 따라 누적소성침하량이 감소하는 효과가 상당히 크나, 말뚝 개수가 16개 이상으로 증가하면 그 감소효과가 떨어지는 것으로 나타났다. 즉 궤도 1m 당 말뚝 개수가 약 0.9개/m(18.2m 길이에 16개의 말뚝 설치된 경우) 이상인 경우는 말뚝 설치 개수 증가에 의한 누적소성침하량 감소 효과가 상대적으로 작아지는 것으로 평가되었다.

그러나, 궤도 단위 길이 당 같은 개수의 말뚝을 설치한 경우에도 말뚝 간격이나 열수에 따라 누적소성침하량이 상당한 차이를 나타내고 있으며, 이를 통해 누적소성침하량의 효과적인 감소를 위해서는 적절한 말뚝 배치가 필요한 것을 알 수 있다.

현재 설치되고 있는 고속철도의 콘크리트궤도의 경우 20~30mm의 궤도침하에 대처할 수 있도록 설계되고 있다. 표 5에서 원지반 강성이 10MPa, 20MPa이고 말뚝을 설치하지 않은 경우 누적소성침하량은 각각 34.3mm, 25.4mm로 20mm를 초과할 것으로 예측되었으며, 이 경우 각각 궤도 1m당 0.22개, 0.11개의 소수의 말뚝을 설치함으로써 누적소성침하량을 허용치 이하로 효과적으로 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 적용한 누적소성침하량 산정 기법에 대한 실제적인 검증이 아직 이루어 지지 않았기 때문에 이러한 정량적인 분석은 무리가 있으며, 해석 결과를 실제 문제에 적용하기 위해서는 향후 실물 재하시험이나, 현장 계측을 통한 추가적인 연구가 반드시 필요하다.

#### 4.2 말뚝 배치에 따른 침하량

표 6은 말뚝의 간격과 열수가 다르지만 단위 길이당 말뚝 설치개수가 같은 조건인 경우의 누적소성침하량을 비교하여 나타낸 것이다. 표 6에 나타난 바와 같이 단위 길이당 동일한 개수의 말뚝이 설치된 경우에도 말뚝 배치에 따라 누적소성침하량의 상당한 차이가 나타났다.

표 6에 나타난 말뚝 배치에 따른 누적소성침하량을 검토하면, 단위 궤도길이 당 동일한 개수의 말뚝을 설치하는 경우 말뚝 열을 감소시켜 배치할수록 소성침하 감소 효과가 큰 경향이 나타났다. 예외로 말뚝 간격이 10.4m 간격으로 2열로 배치한 경우와, 5.2m 간격으로 1열로 배치한 경우를 비교할 때 원지반 강성이 20~40MPa에서는 말뚝을 1열로 배치하는 경우보다 2열로 배치하는 경우가 누적소성침하가 작게 나타났으나, 이를 제외하면 모두 원지반 조건에 상관없이 말뚝을 작은 수의 열로 배치하는 것이 누적소성침하가 더 작게 나타났다.

또한 표 6에서 원지반 강성이 작을수록 말뚝 배치에 따른 누적소성침하량의 차이가 큰 경향이 나타났다. 특히, 원지반 강성이 10MPa인 경우 다른 경우에 비해 그 차이가 크게 나타났으며, 동일한 개수의 말뚝을 1열로 배치한 경우 2열로 배치한 경우에 비해 누적소성침하량이 말뚝간격에 따라 각각 3.7mm, 2.5mm 감소하였고, 말뚝을 1열로 배치한 경우 3열로 배치한 경우에 비해 8.8mm 감소하였으며, 2열로 배치한 경우 3열로 배치한 경우에 비해 7.2mm 감소하였다. 따라서 누적소성침하 감소 목적으로 말뚝을 설치하는 경우 3열로 말뚝을 배치하는 것은 매우 부적절하며, 말뚝을 1열로 설치하는 것이 가장 효율적인 것으로 평가되었다.

표 6. 말뚝단위길이 당 말뚝개수가 동일한 경우 말뚝 배치에 따른 누적소성침하량

말뚝 배치 형태	원지반 강성에 따른 누적소성침하량(mm)			
	10MPa	20MPa	30MPa	40MPa
말뚝을 5.2m 간격으로 1열로 배치	19.3	17.6	16.3	15.9
말뚝을 10.4m 간격으로 2열로 배치	24.0	16.9	15.2	12.9
말뚝을 2.6m 간격으로 1열로 배치	7.1	7.0	7.3	6.9
말뚝을 5.2m 간격으로 2열로 배치	9.6	8.1	7.6	6.8
말뚝을 3.25m 간격으로 1열로 배치	10.9	9.6	10.6	9.6
말뚝을 10.4m 간격으로 3열로 배치	19.7	15.2	13.8	11.1
말뚝을 3.25m 간격으로 2열로 배치	1.7	2.7	3.4	3.1
말뚝을 5.2m 간격으로 3열로 배치	8.9	5.8	5.7	5.8



## 6. 결 론

본 연구에서는 수치해석과 경험식을 결합하여 말뚝이 설치된 콘크리트궤도 하부의 누적소성침하를 예측할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안된 해석기법은 탄소성 지반모델을 적용한 수치해석을 통해 비교적 정확하게 산출된 지중응력 상태를 경험적인 소성침하의 예측식에 적용하는 방법으로, 현재까지는 열차 반복하중에 궤도의 소성침하를 예측하기 위한 가장 적합한 방법인 것으로 판단된다. 그러나 좀 더 합리적인 소성침하 예측을 위해서는 작용하중 및 구조물 특성에 따른 응력수준과 국내 토질특성에 맞는 새로운 경험식의 개발이 필요하다.

해석 결과의 분석으로 부터 유추할 수 있는 누적소성침하 감소 목적으로서의 말뚝 설치 효과는 다음과 같다.

- (1) 궤도 1m당 말뚝 설치개수가 1개 이하인 경우는 말뚝 설치개수의 증가에 따라 누적소성침하량이 급격히 감소하는 효과가 나타났다. 따라서 선단이 암반에 안치되지 않은 소수의 소구경 마찰말뚝을 설치하여 열차 반복하중에 의한 콘크리트 궤도의 누적소성침하량을 합리적이고 경제적으로 감소시킬 수 있는 것으로 평가되었다.
- (2) 말뚝 열과 간격을 변화시켜 말뚝 배치에 따른 말뚝 설치효과를 누적소성 침하량 감소 측면에서 분석한 결과, 단위 궤도 길이에 대하여 동일한 말뚝을 설치하는 경우는 말뚝을 여러 열로 배치하는 것 보다 단일 열로 배치하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

본 연구는 piled raft 기초의 개념을 철도분야에 적용하여 말뚝 설치를 통한 콘크리트궤도의 효율적인 침하 억제 가능성을 타진하기 위한 것으로 아직까지는 근본적이고 이론적인 단계에 있다. 따라서 제시된 예측기법을 정량적으로 활용하기 위해서는, 현장계측 및 반복재하시험을 토대로 한 연구가 병행되어 실질적인 측면의 검증이 필요하며, 더불어 실무적인 관점에서 타 지반보강공법과의 경제성 측면의 비교 분석이 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-611-D00034)

## 참 고 문 헌

1. 김홍택, 강인규, 황정순, 전용진, 고용일 (1999), "유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초의 최적설계", *한국지반공학회 '99 가을학술발표회*, pp.415-422.
2. Baladi, G. Y., Vallejo, L. E. and Goitom, T. (1983), "Normalized characterization model of pavement materials", *ASTM special technical publication 807*, ASTM, pp.55-64.
3. Bowles, J. E. (1988), "*Foundation Analysis and Design*". 4th edition, McGraw-Hill.
4. Burland, J. B., Broms, B. B. and De Mello, V. F. B. (1977), "Behaviour of Foundations and Structures", *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng*, Tokyo, Vol.2, pp.495-546.
5. Itasca Consulting Group Inc. (1997), "*FLAC3D Manual: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 2.0*", Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA.
6. Horikoshi K and Randolph M. F. "Centrifuge modeling of piled raft foundation on clay", *Geotechnique* 1996; 46(4); 741-752.
7. Hyde, A. F. L. and Brown, S. F. (1976), "The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading", *Geotechnique*, 26(1), pp.173-184.
8. Kim, K, Lee, S-H, Kim, K-S, Chung C-K, Kim, M. and Lee, H. (2002), "Optimum Pile Arrangement for Minimizing Differential Settlements in Piled Raft Foundation", *Computers and Geotechnics* Vol.28, pp.235-253
9. Li, D. and Selig, E. T. (1996), "Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils", *J. Geotech Engrg.*, ASCE, 124(4), pp.316-322.
10. Monismith C. L., Ogawa, N., and Freeme, C. R. (1975), "Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading", *Transp. Res. Rec.*, No. 537, pp.1-17
11. Sommer, H., Tamaro, G. and De Benedictis, C. (1991), "Messes Turm, Foundations for the Tallest Building in Europe", *Proceeding 4th International Deep Foundation Institute Conference*, Stressa, 1991, pp.139-145.
12. Tan, Y. C., Chow, C. M. and Gue, S. S. (2004), "Piled Raft with Short Piles for Low-Rise Buildings on very Soft Clay", *15th SEAGC*, Bangkok.

(접수일자 2008. 3. 12, 심사완료일 2008. 5. 7)