

# 기초형상에 따른 전철주기초 모멘트 저항거동에 관한 수치해석 연구

## Numerical Analyses on Moment Resisting Behaviors of Electric Pole Foundations According to Their Shapes

이 수 형<sup>1</sup> Lee, Su-Hyung

### Abstract

Electric pole foundations for overhead catenary system of railroad should be designed so that they may resist significant overturning moment but relatively small vertical forces. Also they should have proper shapes to be installed at restricted narrow areas adjacent to railroad track. In this paper the moment responses of rectangular pole foundations according to their shapes were investigated numerically. A three-dimensional finite element method was developed and verified so that the numerical behaviors of the foundation resisting the overturning moments were compared reasonably well with those from an existing real-scale load test. The influences of aspect ratio, varying section with depth and loading directions for rectangular section were investigated using the developed numerical method. From the numerical results, the optimized shapes of pole foundation for more effective and economic installation adjacent to railroad track are proposed.

### 요 지

가공 전철선의 지지를 위하여 철도선로에 근접하여 설치되는 전철주기초는 풍하중에 의한 매우 큰 전도 모멘트에 저항하도록 설계되어야 하며 동시에 철도선로 인근의 좁은 공간에 설치될 수 있는 형상을 가져야 한다. 본 논문에서는 수치해석을 통해 전철주기초의 형상에 따른 모멘트 저항거동을 평가하였다. 전도에 저항하는 전철주기초의 거동 특성을 모사할 수 있는 3차원 유한요소해석기법을 개발하였으며, 해석결과를 기존의 실물 재하시험 결과와 비교하여 그 유효성을 확인하였다. 세장비, 깊이에 따른 단면 변화, 직사각형 단면의 하중재하 방향 등을 변화시킨 다양한 조건의 기초에 대하여 모멘트 저항거동을 분석하였으며, 그 결과를 이용하여 철도선로에 근접하여 보다 효율적이고 경제적으로 시공이 가능한 전철주기초 형상을 제시하였다.

**Keywords :** Electric pole foundation, Railroad, 3D finite element method, Foundation shape, Moment capacity

### 1. 서 론

우리나라 철도는 1970년대 초반부터 전기에 의하여 열차가 구동되는 전철화가 시작되었으며, 2012년 현재 전체 철도선로 길이인 3,650km의 69.1%인 2,522km의 노선이 전철화 되어 있다(Korea Rail Network Authority, 2013). 또한 Korea Transport Institute and KRTC(2009)

에 의하면 2019년까지 1,596.3km 구간을 전철화하는 계획을 국가적으로 수립 중에 있다. 따라서 철도의 전력 시설물에 대한 합리적인 설계 및 시공을 통하여 국가적인 예산의 절감이 필요한 상황이다. 철도 선로의 전철화를 위해서는 전력공급을 위하여 선로를 따라 가공전선(overhead catenary)을 설치해야 하며, 이를 위해서는 선로 연변에 Fig. 1과 같은 전철주와 이를 지지하는 기

<sup>1</sup> 정회원, 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5399, Fax: +82-31-460-5326, geoxlee@krrri.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

초가 설치되어야 한다. 일반적인 전철주기초는 짧은 강제말뚝(short rigid pile)으로 분류할 수 있는 형태로 비교적 작은 수직하중을 받으며, 주로 전철선과 전철주에 작용하는 수평방향의 풍하중에 의하여 유발되는 매우 큰 모멘트에 대하여 전도(overturning)가 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 따라서 일반적인 얇은기초나 말뚝기초의 횡방향에 대한 거동과 달리, 전철주기초의 경우는 기초 전면과 배면에 각각 작용하는 토압의 쌍으로 발휘되는 모멘트를 통해 전철주의 전도에 대하여 저항하게 된다.

짧은 강제말뚝의 전도에 대한 모멘트 저항 거동에 대

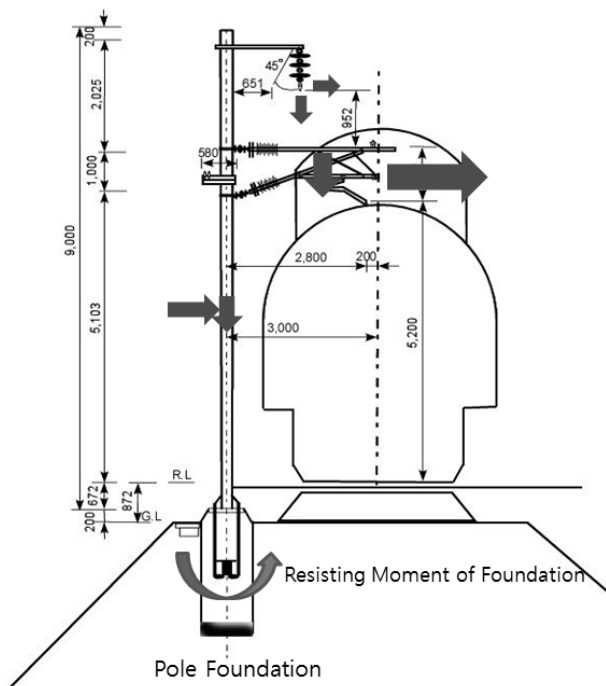


Fig. 1. Schematics of Loads acting on a Pole Foundation of Railroad

한 연구에는 주로 원심모형시험 또는 수치해석을 통한 방법들이 적용되어 왔으며(Balfour Beatty Construction Ltd., 1986; Broms, 1964; Brinch Hansen, 1961; UIC/ORE, 1957, Dickin and Nazir, 1999), 국내에서는 Korea Railroad Research Institute(2010)가 실물 크기의 전철주기초에 대하여 실제조건에 가까운 모멘트 위주의 하중을 적용한 실물 재하시험을 통하여 기초의 모멘트 저항 거동을 평가한 바 있다.

전철주를 지지하는 기초는 Fig. 2와 같이 철도 선로에 근접하여 설치되므로, 설치를 위한 굴착부가 선로와 간섭을 일으키며 이로 인해 선로 유지를 위한 가설 흙막이를 설치하는 등의 조치가 필요한 상황이다. 따라서 가능한 선로 직각 방향의 기초 크기를 감소시켜 굴착부를 최소화 하는 것이 필요하다. 전술한 바와 같이 전철주기초의 경우 선로 직각 방향으로만 큰 모멘트를 받는 구조물로 주로 기초에 작용하는 마찰력 보다는 연직토압에 의하여 지지하므로, 선로 방향의 기초 폭을 증가시키고 선로 직각 방향의 기초 폭을 감소시키면 선로 인접 시공의 문제를 해결할 수 있을 것이다. 또한 구속압에 따라 강도가 증가하는 흙의 특성을 감안하여, 구속압이 큰 기초 하부의 크기는 감소시키고, 구속압이 작은 지표 부근의 기초 크기는 증가시킴으로써 전체 굴착면적을 감소시키는 방안의 적용도 고려가 가능하다. 본 논문에서는 전철주기초의 거동을 파악할 수 있는 3차원 유한요소해석 기법을 개발하고, 기존의 실물재하시험 결과를 이용하여 그 유효성을 검증하였다. 개발된 해석기법을 적용하여 다양한 기초형상에 따른 모멘트 저항거동을 분석함으로써, 철도 선로에 근접하여 보다 효율적으로 시공이 가능한 전철주기초 형상을 제안하였다.

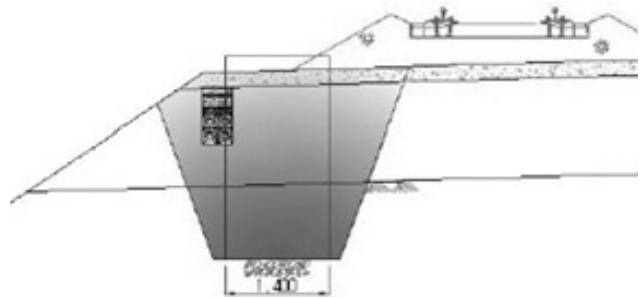


Fig. 2. Interference of railroad track due to excavation for pole foundation

## 2. 철도선로용 전철주기초의 특성

### 2.1 전철주기초에 작용하는 하중

철도 선로에 설치되는 전철주는 선로의 곡선반경( $R$ )에 따라 20m~60m 간격으로 배치된다. 따라서 전철주 하나는 20~60m 길이의 전선 및 이를 고정하기 위하여 부착되는 구성품에 작용하는 각종 하중(자중, 풍하중, 전선의 장력 등)을 지지하여야 한다(Fig. 1). 철도설계편람(Korea Rail Network Authority, 2004)에서 전기철도 구조물의 설계를 위하여 고려하는 하중의 종류는 전철선 및 전철주에 작용하는 풍압하중, 곡선선로에서 전선에 작용하는 장력, 전철선 및 전철주의 자중, 전철선에 부착되는 얼음에 의한 피빙하중 등이 있다. Table 1은 선로의 곡선반경이 1,000m로 전철주가 50m 간격으로 설치된 경우에 전철주기초의 상부에 작용하는 하중 및 모멘트를 계산한 예로, 작용하는 수평 및 수직 하중에 비하여 상당히 큰 모멘트가 작용하며, 특히 풍하중에 의한 모멘트가 70% 정도의 매우 큰 비중을 차지하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 가장 큰 비중을 차지하는 전

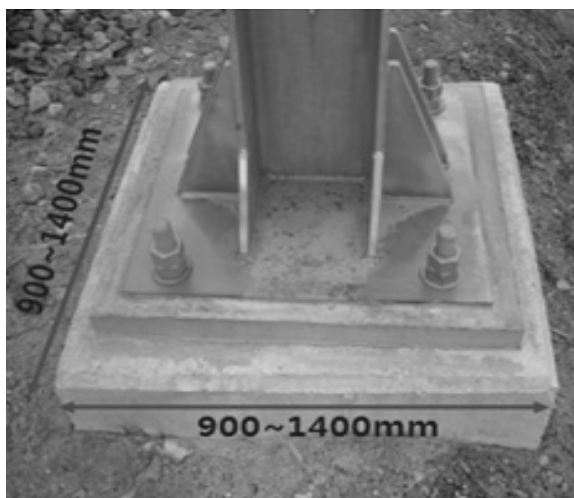
Table 1. Examples of loads acting on a pole foundation for pole span distance 50 m and track radius of curvature ( $R$ ) 1000 m

Types of loads		Load (kN)	Moment (kN·m)
Vertical		11.63	5.40
Horizontal	Catenary Tension	2.11	15.56
	Wind	6.96	45.01

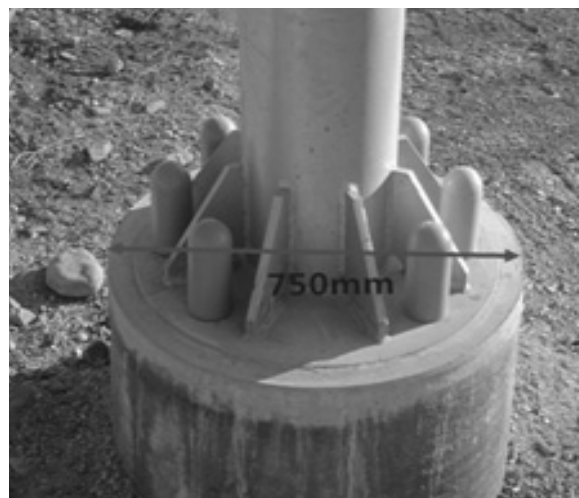
선에 작용하는 수평하중이 전철주기초로부터 7m 이상 떨어져 작용하기 때문이며, 따라서 전철주기초는 매우 큰 모멘트를 저항하여 전도(overturning)가 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

### 2.2 전철주기초의 시공 방법

현재 국내 전철주기초는 Fig. 3과 같이 사각형과 원형의 두 가지 형태로 설계 및 시공되고 있다. 사각형기초는 전통적으로 시공 되던 기초 형태로서 기계굴착과 인력굴착을 병행하여 설치되며 작용하중이 크거나 지반이 연약한 개소에 주로 적용되고 있다. 기본적으로는 소요깊이까지 완전히 굴착하고 거푸집을 제작한 후, 콘크리트 양생이 완료되면 기초 주변지반을 굴착하여 거푸집을 완전히 제거한 후 되메우는 방식으로 시공되어야 하지만, 실제 현장에서는 공벽을 유지할 수 있는 수준의 깊이까지만 거푸집을 설치하고 하부는 거푸집 없이 콘크리트를 굴착지반에 직접 현장타설하는 방법이 주로 적용되고 있다. 사각형 기초의 형상은 철도설계편람(Korea Rail Network Authority, 2004)에 제시되어 있으며, 폭 900mm~1,400mm의 정사각형 단면을 가진 근입깊이 1,800mm~3,200mm의 기초가 적용되고 있다. 원형기초는 경부고속철도 건설에 처음 도입되기 시작하였으며, 철도 선로를 운행할 수 있는 굴착장비를 이용하여 75cm 직경의 구멍을 정해진 깊이까지 굴착한 후 콘크리트를 현장 타설하는 방법에 의하여 시공되고 있다. 전철주기초는 철도선로에 근접하여 시공되기 때문



(a) Rectangular concrete foundation



(b) Circular concrete foundation

Fig. 3. Types of electric pole foundations in Korean railroad

에 적용 가능한 굴착 장비의 제약이 큰 상황으로, 특히 기존철도를 전철화 하는 경우는 소형장비와 인력을 이용한 굴착이 이루어질 수 밖에 없으므로 원형기초는 적용하기 어려우며 주로 사각형기초가 적용된다. 본 논문에서는 사각형기초의 단면을 효율화하는 것을 목표로 하여 수치해석 대상으로 결정하였다.

### 3. 수치해석 기법

#### 3.1 수치해석 기법 개요

상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 해석 범위로는 전철주기초가 받는 모멘트 위주의 하중을 고려하기 위하여 기초뿐만 아니라 기초 상부에 고정되는 전철주도 해석 영역에 포함하였다. Fig. 4는 해석 범위로 결정한 모델링 영역을 나타내며 하중 재하방향을 중심으로 한 대칭성을 고려하여 전체 영역의 1/2만을 모델링 하였다. 해석 경계는 수평방향으로 기초 폭의 10배 정도인 10.0m, 수직방향으로는 기초 근입깊이의 2배 이상인 5.0m의 지반영역을 포함하도록 하였으며, 해석결과에서 기초의 파괴 시 발생하는 지반 응력이나 변형이 모두 해석 영역

안에서 발생하는 것을 확인하였다.

#### 3.2 지반의 모델링

지반모델로는 구속압에 의하여 파괴응력이 변화하는 Mohr-Coulomb 파괴모델을 적용하였다. 저감적분(Reduced integration)을 적용한 선형 육면체 유한요소 36,180개를 사용하여 요소망을 구축하였으며, 기초와 가까울수록 조밀한 요소망을 적용하여, 전도에 의한 기초주변 지반에 발생하는 복잡한 응력 변화를 명확하게 파악할 수 있도록 하였다(Fig. 4). 흙과 기초의 자중을 적용하여 전철주에 작용하는 외적하중 재하 이전에 지반에 발생하는 정적토압 분포를 재현하였다. Fig. 5는 정적하중 재하로 발생한 지반 내 수직응력 분포로, 토압분포를 명확하게 나타내기 위하여 콘크리트 기초 요소는 제외하고 지반 요소만을 나타냈다. 흙의 자중에 의하여 깊이에 따라 증가하는 수직응력 분포가 정확하게 나타나고 있으며, 흙보다 단위중량이 큰 기초의 자중에 의하여 기초 하부 지반에서 주변부 보다 조금 증가된 수직응력이 발생한 것을 알 수 있다.

지반에 대해서는 균질한 조건 뿐만 아니라 깊이에 따라 변화하는 조건을 고려하기 위하여 Fig. 6과 같이 기

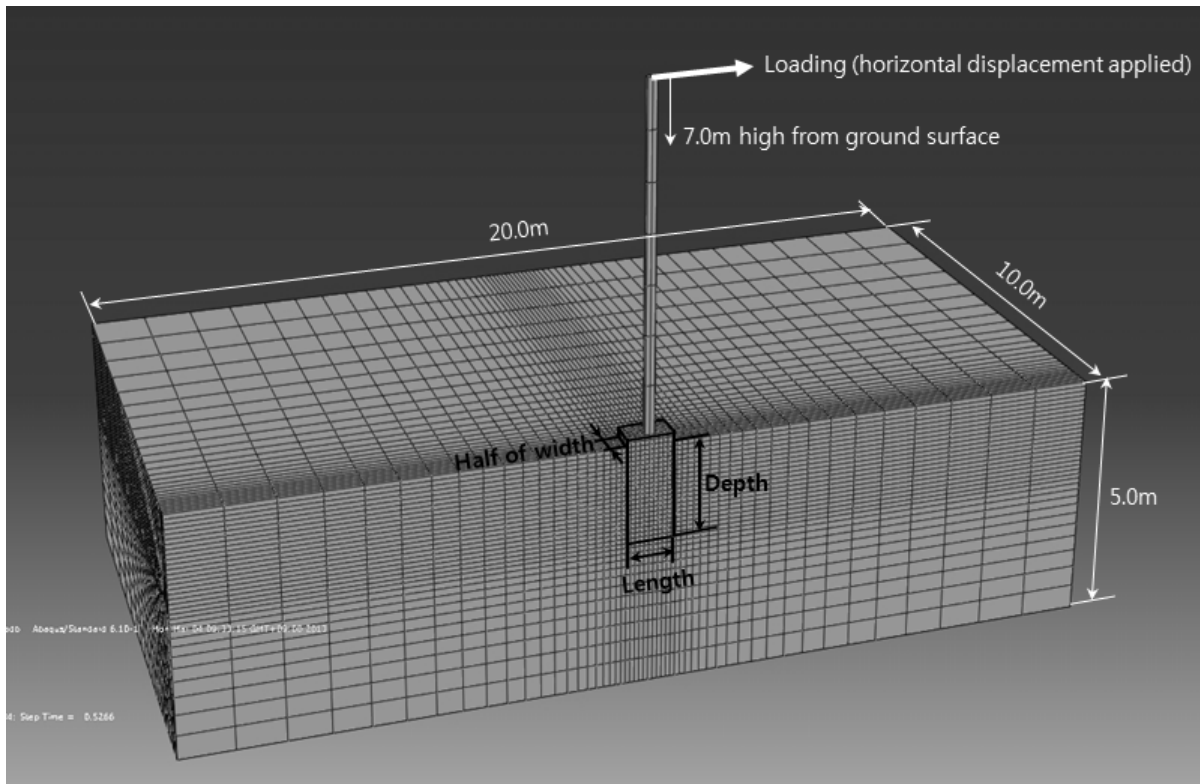


Fig. 4. Schematics of numerical method

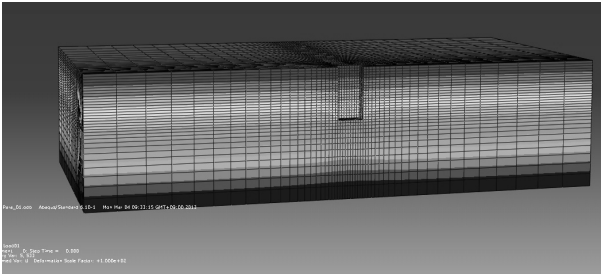


Fig. 5. Vertical stress distribution for geostatic condition

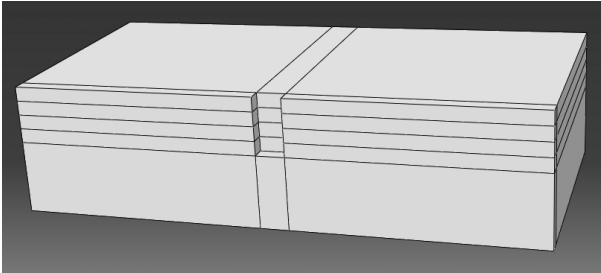


Fig. 6. Soil layers for multilayer analyses

초 근입깊이까지 4개층, 기초 하부는 1개층으로 총 5개 층으로 나눈 다층해석도 수행하였다.

### 3.3 기초와 지반 사이의 경계 모델링

각각 강철과 콘크리트로 제작되는 전철주와 기초에 대해서는 흙에 비하여 강도가 매우 크므로 모두 선형탄성모델을 적용하였다. 유한요소망은 기초에 대하여 1000개, 전철주에 대하여 14개의 저감적분 육면체요소를 이용하여 구성하였다(Fig. 7).

기초의 경우는 콘크리트의 일반적인 단위 중량인 23 kN/m<sup>3</sup>을 적용하여 기초의 자중에 의한 기초하부 토압의 증가와 모멘트 저항 효과를 고려할 수 있도록 하였다. 기초와 전철주의 강성은 무한대에 가깝게 매우 크게 설정함으로써 변형이 발생하지 않는 강체로 거동하도록 설정하였으며, 이는 모멘트 재하에 따른 기초와 지반 사이의 상호작용에 의한 거동만을 명확하게 파악하기 위함이다. 기초와 지반사이의 경계에는 Coulomb의 법칙을 적용하여, 기초의 절점과 흙의 요소면 사이에 작용하는 연직력에 비례하는 마찰력을 작용시키는 부과조건을 부여하였다. 이때 연직력과 마찰력의 비례상수인 흙과 콘크리트 사이의 마찰계수( $\mu$ )는 Kulhawy et al.(1983)이 거친 콘크리트(rough concrete)에 대하여 제안한 바에 따라 흙의 내부마찰각과 같은 크기의 마찰각을 이용하여 산정하였으며, 이는 해석 대상 기초가 현장타설 방

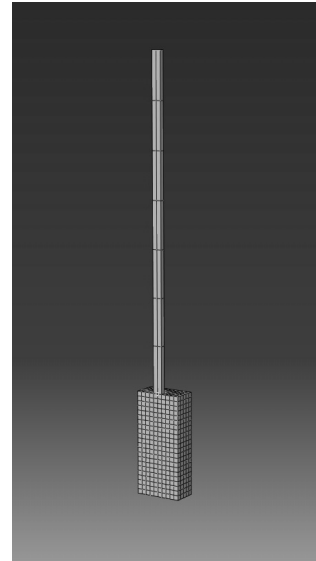


Fig. 7. Finite Element mesh for pole and foundation

식으로 시공된 것을 감안한 것이다. 발생하는 마찰력의 크기에는 한계를 두지 않았으며, 원활한 수렴을 위하여 흙과 기초의 경계면에 발생하는 최대 탄성 상대변위는 흙의 요소면 크기의 0.005배(약 0.5mm)로 제한하였다.

### 3.4 하중 및 경계조건 적용

평상시의 기초상태를 모사하기 위하여, 기초에 상시 작용하는 전철주, 브라켓 등의 무게에 의한 수직하중과 기초의 자중은 모멘트 적용 이전에 재하하여 풍하중 등의 활하중이 재하되지 않는 평상 조건에서 기초 및 지반이 받는 응력을 재현하였다. Table 1에 제시된 바와 같이 곡선반경이 1,000m인 선로에서 전철주가 50m간격으로 배치된 경우에, 50m 길이의 전철선 및 조가선, 전철주, 부속품 등의 자중에 의해 기초에 작용하는 수직하중은 11.6kN가 된다. 이를 고려하여 합력이 10kN이 되도록 기초와 전철주 상면에 수직 등분포하중을 작용시켰다. 해석에서 등분포하중을 재하한 이유는 수직하중으로 인해 발생하는 모멘트를 배제하기 위함이다.

항복 이후의 거동 평가를 통해 명확한 기초의 저항모멘트 산정하기 위하여 변위제어 방식으로 모멘트를 재하하였다. 기초에서 수직방향으로 7.0m 이격된 전철주 상단의 중앙 절점에 수평방향의 변위를 부여하였으며, 해당 절점에서의 수평방향 반력을 이용하여 기초에 작용하는 모멘트를 산정하였다. 변위의 증가분은 수렴 여부에 따라 최소 1.0×10<sup>-4</sup>mm에서 최대 10mm의 변위를 단계적으로 부여하였다. 하중제어를 한 경우에는 기초



Fig. 8. Real scale load test for pole foundations(KRRI, 2010)

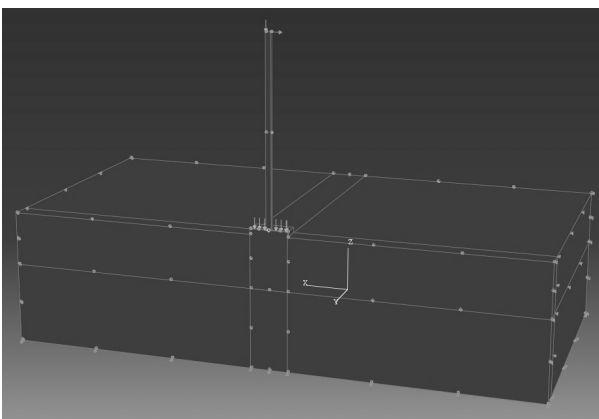


Fig. 9. Loading and boundary conditions for the analyses

의 항복이 발생한 이후의 하중 조건에서는 해석이 수렴하지 않아 명확한 기초의 저항 거동에 대한 평가가 불가능하였다. Fig. 9는 해석모델에 적용된 하중과 경계조건을 나타낸다. 경계조건으로는 지표와 구조물을 제외한 모든 해석 경계면에서 경계면에 수직인 방향의 변위를 구속하였다.

## 4. 해석 결과의 검증

### 4.1 비교 대상 실물 재하시험

Korea Railroad Research Institute(2010)는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 실물 전철주기초에 대하여 전철주 상부

를 인장하는 실제 조건의 하중 재하를 통해 전철주기초의 파괴를 확인하는 재하시험을 수행하였으며, 본 논문에서는 그 결과를 이용하여 수치해석 결과의 유효성을 검증하였다. 재하시험이 수행된 지반은 통일분류법의 SW에 해당하는 흙으로 구성되었다. 전철주기초 설계를 위한 현장지반조사는 시추장비의 진입이 어렵고, 깊은 심도의 조사가 요구되지 않으므로 LFWD(Light Falling Weight Defletometer)와 동적콘관입시험기(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)를 주로 이용하고 있으며, 본 논문에서도 이들 방법을 적용하여 지반의 강도와 강성을 평가하였다. Table 2는 재하시험을 위하여 설치된 기초의 주변 지반에 대하여 수행한 LFWD와 동적콘관입시험의 결과로서 10회 이상의 시험결과를 평균한 값이다. Table 2에 제시된 내부마찰각은 1회 타격당 콘의 관입깊이인 DCPI(Dynamic Cone Penetration Index)로부터 Mohammadi et al.(2008)이 제시한 아래의 식 (1)을 이용하여 산정되었다.

$$\phi = 52.16(DCPI)^{0.13} \text{ (degree)} \quad (1)$$

재하시험에서는 실제 하중조건을 모사하기 위하여 Fig. 8과 같이 강철 케이블을 전철주에 연결하고 크레인을 이용하여 인장하였으며, 재하 위치는 일반적인 전철선 위치(레일 상면으로부터 약 7m)를 고려하여 결정되었다. 전철주에 전달되는 하중은 케이블에 장착된 로드셀을 이용하여 측정되었으며, 하중재하에 따른 전철주기초의 수평, 수직 변위 및 회전량이 측정되었다.

### 4.2 모멘트 저항 거동의 비교

개발된 해석기법의 유효성 검증을 위하여 실물 재하시험에서 산정된 기초의 모멘트-회전각 곡선을 해석 결과로 산출된 곡선과 비교하였다. 해석 대상 기초는 단면이 1.1m×1.1m이고 지표로부터의 근입깊이가 2.2m로, 철도 본선에 적용되는 단독주 형태의 전철주에 사용되는 가장 대표적인 형상(표준단면 B2)에 해당한다. 지반 특성과 관련하여 내부마찰각과 지반강성은 Table 2에

Table 2. Results of soil investigation (KRRI, 2010)

Testing methods	LFWD	DCP	
	Elastic Modulus at ground surface (MPa)	DCP Index (cm)	Internal Friction Angle (degree)
Results	42.9	2.5	34.3

제시한 현장 지반조사 결과를 적용하였다. 흙의 점착력은 해석의 수렴 안정성 확보를 위하여 매우 작은 값인 1.0kPa을 적용하였다. 팽창각은 Vermeer and de Borst (1984)가 제안한 느슨한 사질토의 상한치인 10도를 적용하였다. 지반 강성의 경우는 LFWD로 측정된 값이 지표 부근에서의 값이므로 전체 근입깊이의 강성을 대표할 수 없다. 따라서 Bowles(1988)가 제시한 전형적인 탄성계수를 적용하여, 조밀한 사질토(dense sand)에 대한 상한치인 81MPa과 조밀한 자갈섞인 사질토(Dense sand and gravel)의 중간치인 150MPa를 각각 기초하부 최하부층의 강성으로 하여 탄성계수를 깊이에 따라 단계적으로 증가시킨 2 종류의 다층지반 해석도 수행하였다. Table 3에는 해석에 사용된 지반 및 구조물의 재료특성을 정리하여 나타내었다.

Fig. 10에는 해석결과로 산출된 모멘트-회전각 곡선을 실험재하시험의 결과와 함께 나타내었다. 재하시험 결과로 나타난 모멘트-회전각 거동은 회전각 0.02도 부근에서 모멘트의 증가에 따라 회전각이 급격하게 증가하기 시작하는 거동을 나타내고 있으며, 항복 이후에는 모멘트 증가에 대하여 일정한 비율로 회전각이 증가하

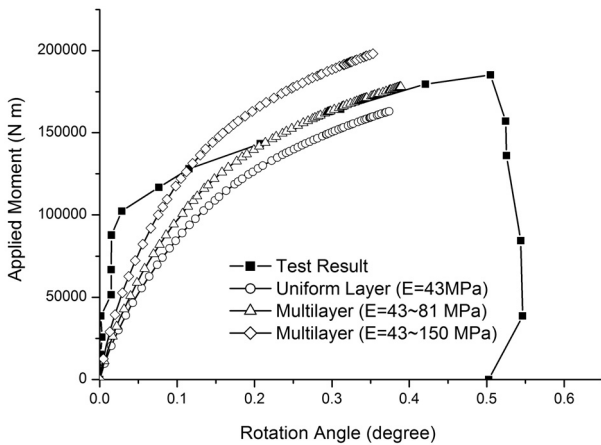


Fig. 10. Comparison of Moment-rotation angle curves between test and numerical results

는 회전각 경화현상이 나타났다. 그러나 해석결과에서는 뚜렷한 항복점이 나타나지 않는 쌍곡선 형태의 연성 거동을 보였으며, 회전각 0.1도 부근에서 모멘트-회전각 곡선의 최대 곡률점이 나타나서, 초기 강성이 재하시험 결과와 다소 큰 차이를 나타내었다. 이러한 하중 초기 영역에서의 거동 차이는 조밀한 사질토에서 나타나는 첨두강도(peak strength)의 영향을 Mohr-Coulomb 모델에서 적절하게 반영할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 항복 이후의 회전각 0.2도 부터는 회전각에 따른 모멘트의 증가율에 대한 시험결과와 해석결과가 대체로 일치하는 결과가 나타났다.

Fig. 10에는 다층해석을 통해 깊이에 따라 탄성계수를 증가시킨 결과도 함께 나타내었다. 전체 지반에 대하여 균질하게 지표부근에서 측정된 탄성계수(42.9MPa)를 적용한 경우는 항복 이후에 시험결과에 비해 동일 회전각에서 저항모멘트가 작게 나타났다. 조밀한 모래의 상한치인 81MPa 까지 깊이에 따라 단계적으로 탄성계수를 증가시킨 경우는 항복 이후에 시험결과와 보다 정확하게 일치하는 거동을 보였다. 그러나 조밀한 자갈 섞인 모래의 중간치인 150MPa까지 탄성계수를 증가시킨 경우는 초기강성은 시험결과와 조금 더 가까워 졌지만 항복이후에는 회전각에 따른 모멘트 증가율은 시험 결과보다 크게 나타났다. 전체적으로 강성 변화에 따른 기초 항복 거동의 양상은 크게 변화하지 않았다.

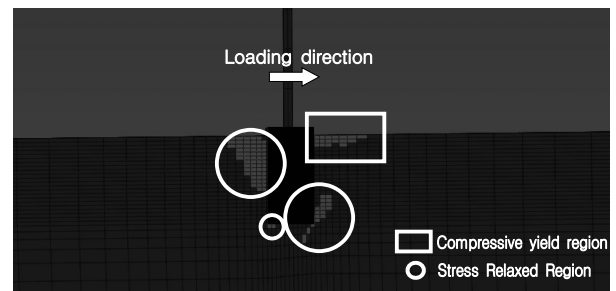


Fig. 11. Soil Region of plastic state at the beginning of foundation yield

Table 3. Properties of soil and structures for the analyses

Material		Elastic parameters			Mohr-Coulomb model parameters		
		Elastic Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Weigh density (kN/m <sup>3</sup> )	Friction angle (degree)	Dilatancy angle (degree)	Cohesion (kPa)
Soil	Uniform	42.9	0.3	18.0	34.3	10.0	1.0
	Multi layers	42.9~81.0					
		42.9~150.0					
Foundation		∞	0.5	23.0	-	-	-
Pole		∞	0.5	0	-	-	-

Fig. 11은 수치해석 결과로 나타난 지반의 소성 영역으로, 기초의 항복이 발생하는 시점의 상태이다. 하중재하방향의 기초 전면 지표 부분에는 압축에 의한 수동상태의 항복이 발생한 것으로 나타났다. 기초 상부 배면과, 기초하부 전면과 후면 바닥부에서는 기초와 지반이 분리되면서 구속압 이완에 의한 주동상태의 소성영역이 발생하였다. 인장력을 받을 수 없는 흙의 특성으로 구속압 이완에 의한 지반의 항복은 기초 전체 시스템의 파괴 유발과는 상관이 없으므로, 전철주기초의 파괴는 주로 기초 상부 전면부와 접하고 있는 지표 부근 지반의 압축항복 여부에 의하여 좌우되는 것으로 평가되었다. 이는 Korea Railroad Research Institute(2010)에서 제시한 실험 재하시험 결과로 나타난 기초 상부 전면부에서의 지반 파괴 현상과 일치하는 것이며(Fig. 12), 따라서 수치해석 결과가 기초의 모멘트 저항 거동을 적절하게 반

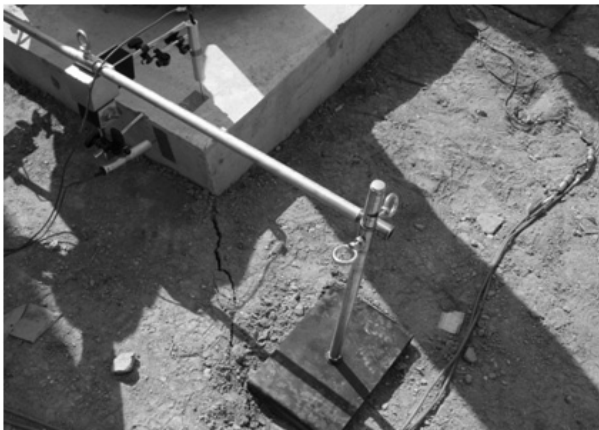
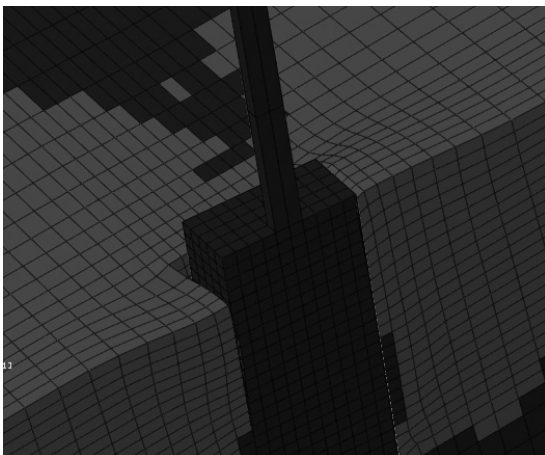


Fig. 12. Failure on the ground surface in front face of foundation (KRRI, 2010)



(a) Analysis result

영하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 파괴로 인해 기초 상부 배면에 나타난 지반과 기초의 분리 양상을 나타내며, 실험 재하시험과 동일하게 수치해석 결과에도 기초와 지반의 분리 현상이 나타나고 있다. 이러한 결과를 통해 수치해석에 적용한 흙과 콘크리트 사이의 경계면 거동 모사가 적절히 이루어진 것으로 평가하였다.

이와 같은 해석과 시험 결과의 비교를 통하여, 적용된 수치해석 방법이 비록 하중 초기영역의 항복 거동은 정확하게 모사하지 못하나, 전반적인 파괴 기구와 항복 이후의 저항모멘트의 크기는 대체로 적절하게 반영할 수 있는 것으로 평가하였다. 따라서 기초 단면 변화에 따른 전철주기초의 모멘트 저항거동을 파악하기 위한 방법으로 개발 수치해석기법의 적용이 가능한 것으로 판단하였다.

### 5. 단면 변화에 따른 전철주기초의 모멘트 저항 거동 분석

개발된 유한요소 해석기법을 적용하여 다양한 형태의 전철주기초의 거동을 분석함으로써, 경제적인 동시에 보다 효율적인 시공이 가능한 기초의 형상을 도출하고자 하였다. 세장비, 기초 상부단면의 확장, 직사각형 배치 등의 조건을 변화시킨 10종류의 단면에 대한 해석을 수행하였다. 비교 평가를 위한 기준 형상으로 폭( $W$ ) 1.0m, 길이( $L$ ) 1.0m, 근입깊이( $D$ ) 2.0m의 기초를 설정하였으며, 기준 기초와의 거동 비교를 통해 기초의 형상 변화에 따른 모멘트 저항 특성을 파악하고자 하였다. 모



(b) Test result (KRRI, 2010)

Fig. 13. Failures at the back surface of foundation



든 종류의 기초 형상에 대하여 기초의 부피를  $2.0\text{m}^3$ 로 동일하게 함으로써, 콘크리트 물량에 따른 경제성의 차이를 성능 비교 분석 시 배제할 수 있도록 하였다. 지반 및 구조물의 특성은 Table 3에 제시된 값을 적용하였으며, 탄성계수로는 최근 철도선로 건설의 상부노반 재료로 주로 적용되는 자갈섞인 모래에 해당하는  $150\text{MPa}$ 을 값이에 따라 균질한 조건으로 고려하였다.

### 5.1 세장비에 따른 기초의 거동 변화

전철주기초의 단면크기와 근입깊이가 모멘트에 대한 저항거동에 미치는 영향을 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 이를 위하여 해석을 수행한 단면은 4종류로 Fig. 14와 같다.

전술한 바와 같이 4종류의 기초 모두 전체 부피는  $2.0\text{m}^3$ 로 동일하도록 하였으며, 이를 위해 기초의 단면이 작은 경우 기초의 근입깊이를 증가시키는 방법을 적용하였다. Fig. 15는 전철주기초의 세장비에 따른 모멘트-회전각 곡선을 나타낸다. 같은 부피인 경우에 기초의 단면이 감소하고 설치 깊이가 깊어짐에 따라 동일 회전각에서

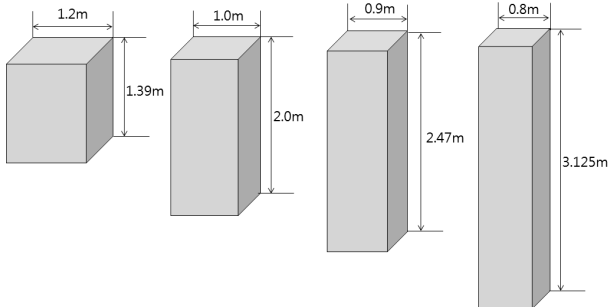


Fig. 14. Shapes of pole foundations respective of aspect ratio

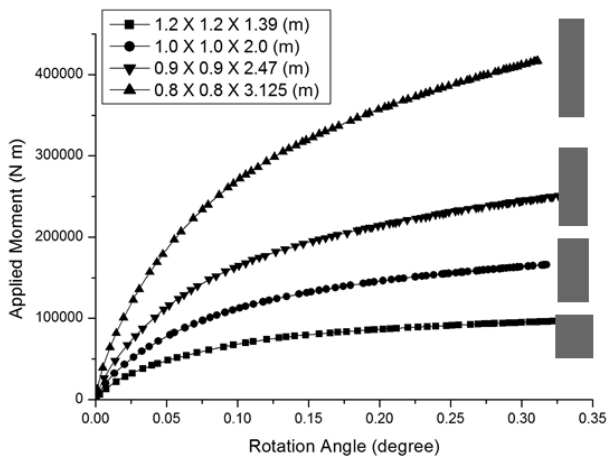


Fig. 15. Moment-rotation angle curves respective of aspect ratio

의 저항모멘트가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Dickn & Laman(2003)은 전철주기초에 대한 원심모형시험 결과로 나타난 쌍곡선 형태의 모멘트-회전각 곡선에 대하여 항복점의 명확한 결정이 어려우므로 특정 회전각에서의 저항모멘트를 비교 분석하는 방법을 적용하였다. 본 논문에서도 저항모멘트의 정량적인 비교를 위하여 회전각의 증가에 따른 모멘트의 증가율이 일정하게 나타나기 시작하는 회전각 0.1도에서 기초가 저항하는 모멘트를 산정하여 비교하였다. Fig. 16에는 기초 크기가  $1.0\text{m} \times 1.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ ( $W \times L \times D$ )인 기준단면 기초의 저항모멘트에 대한 각 기초의 저항모멘트 비율을 표시하여 세장비에 따른 저항모멘트 변화에 대한 용이하게 비교할 수 있도록 제시하였으며, 세장비의 증가에 따른 저항모멘트의 급격한 증가 양상을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 기초의 모멘트 저항이 기초 상부 전면부와 기초 하부 배면부에 작용하는 수동토압이 쌓이 이루어 발휘되기 때문에 두 토압의 합력 간 거리의 증가에 대하여 저항모멘트가 선형적으로 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 기초의 저항모멘트 향상을 위한 가장 효율적인 방안은 기초의 근입깊이를 굴착 및 설치가 가능한 범위에서 되도록 크게 하는 것임을 알 수 있다.

### 5.2 기초 상부단면 확장 효과

Fig. 11과 Fig. 12에 나타난 바와 같이 전철주기초의 모멘트에 대한 항복은 기초상부 전면부의 지표 부근 지반의 항복으로 유발된다. 반면 구속압에 따라 강도가 증가하는 흙의 특성으로 인해 기초 하부의 배면부 주변지반은 기초의 항복이 발생한 경우에도 항복되지 않는 경

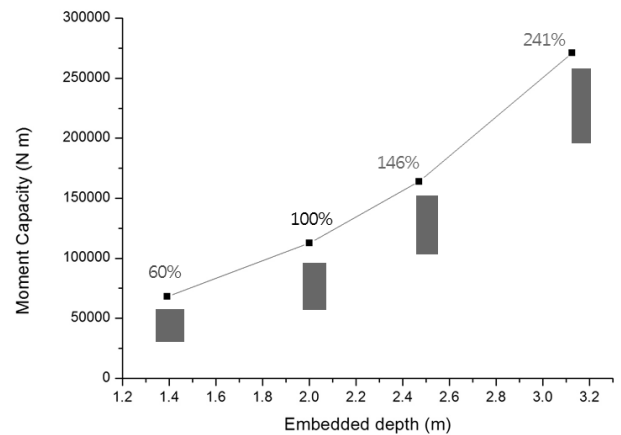


Fig. 16. Moment capacities according to aspect ratio of foundations

향이 나타났다. 따라서 기초상부의 재하방향 폭을 증가시키고, 기초하부의 폭은 감소시키면 지표 부근 지반에 발생하는 토압이 감소되어 좀 더 큰 기초의 저항모멘트가 발휘될 것으로 예측된다. 이러한 개념에 따라 Fig. 17에 나타난 상부가 확장된 4종류의 전철주기초에 대한 해석을 수행하였다. 모든 기초는 재하방향 기초길이가 1.0m이며, 전체 부피는 2.0m<sup>3</sup>로 동일하도록 하였다.

Fig. 18은 해석 결과로 산출된 상부가 확장된 전철주기초의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸다. Fig. 19는 회전각 0.1도에서의 기초의 저항모멘트를 나타낸 것이며, 기초 크기가 1.0m×1.0m×2.0m( $W \times L \times D$ )인 기준단면 기초의 저항모멘트에 대한 각 기초의 저항모멘트 비율을 함께 표시하였다.

Fig. 18과 Fig. 19에서 기초 상부단면의 확장에 의한 저항모멘트의 증가 효과는 확인할 수 있으나, 기초의 폭

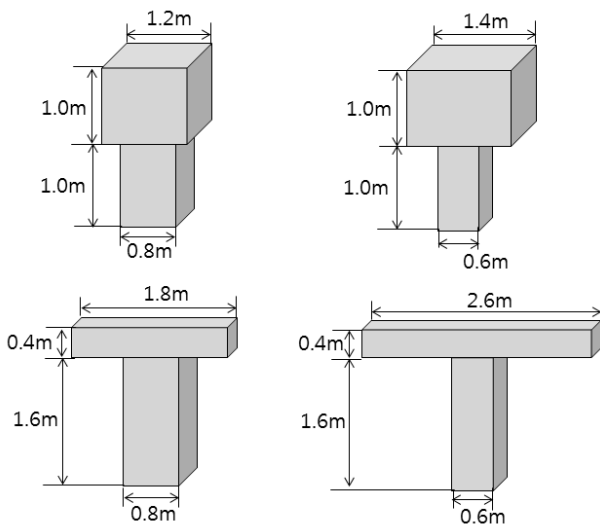


Fig. 17. Shapes of foundations respective of upper part enlargements

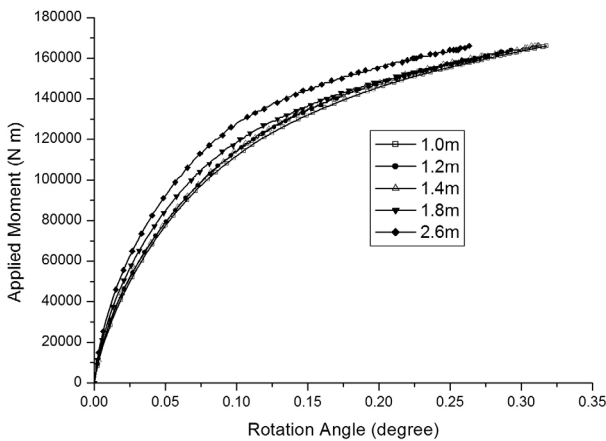


Fig. 18. Moment-rotation angle curves respective of upper part enlargements

을 2.6m로 극단적으로 증가 시킨 경우에도 저항모멘트의 증가는 13% 정도에 그치고 있으며, 상대적으로 세장비를 크게 하여 얻는 저항모멘트 증대 효과에 비해 그 효과가 미미한 것으로 나타났다.

### 5.3 직사각형 단면의 재하방향에 따른 거동

직사각형 단면의 재하방향에 따른 모멘트 저항거동을 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 이를 위하여 전체 부피는 동일하고 재하 방향으로 폭이 큰 1.25m×0.8m×2.0m( $W \times L \times D$ )의 기초와 재하방향으로 폭이 작은 0.8m×1.25m×2.0m( $W \times L \times D$ )의 기초에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 20에는 직사각형 기초의 선로에 대한 재하방향과 해석단면을 나타내었다.

Fig. 21은 해석 결과로 산출된 직사각형 기초의 하중재하 방향에 따른 모멘트-회전각 곡선을 나타내었으며, 회전각 0.1도에서의 저항모멘트를 기초 크기가 1.0m×1.0m×2.0m( $W \times L \times D$ )인 기준단면 기초와 비교한 비율을 표시하였다. 정사각형의 기준단면과 비교할 때 재하방

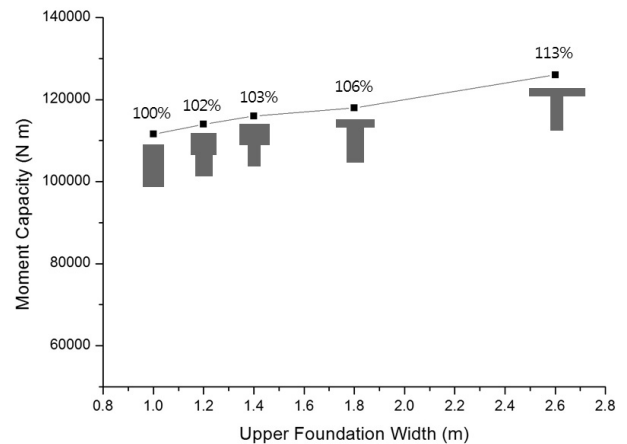


Fig. 19. Moment capacities according to upper part enlargements of foundations

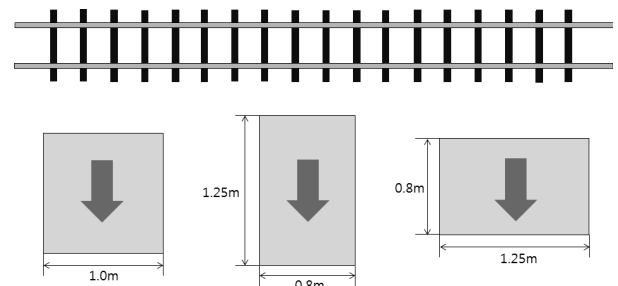


Fig. 20. Schematics of loading directions for the foundations with rectangular sections

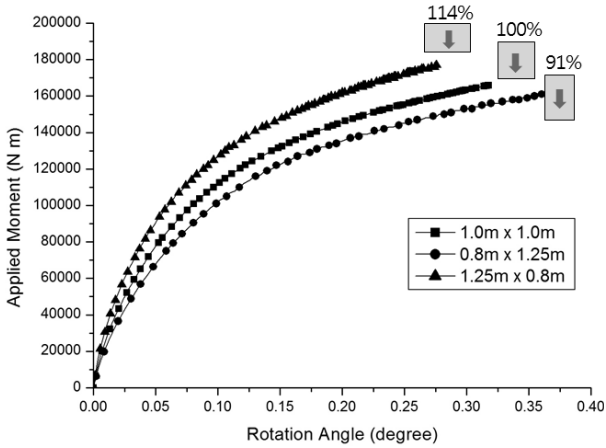


Fig. 21. Moment responses respective of loading directions for rectangular section

향으로 폭을 25% 증가 시킨 경우는 저항모멘트가 14% 증가하였고, 재하방향으로 폭을 20% 감소시킨 경우는 저항모멘트가 9% 감소하였다. 따라서 전철주기초가 전차선에 작용하는 풍하중에 의해 선로직각 방향으로 더 큰 힘을 받는 것을 고려할 때, 기초는 선로 방향으로 폭을 넓힌 직사각형 형태로 설치하는 것이 보다 합리적인 것으로 평가되었다.

#### 5.4 전철주기초 단면의 효율화 방향

세장비, 기초 상부의 확장, 직사각형 기초의 하중 재하방향 등이 기초의 저항모멘트에 미치는 영향을 파악하기 위한 수치해석의 결과를 분석하였으며, 그 결과로 유추할 수 있는 전철주기초 형상 효율화의 주요 요소는 다음과 같다.

- (1) 굴착이 가능한 범위에서 기초를 가능한 깊이 설치하는 것이 저항모멘트 증가에 가장 큰 효과가 있다.
- (2) 기초 단면을 직사각형으로 하여 주재하방향의 기초 폭을 크게 하면 저항모멘트의 증가 효과가 있다.
- (3) 기초상부의 재하 직각방향의 폭을 확장하여 저항모멘트를 증가시키는 방법은 그 효과가 미미하다.

위와 같은 효율화 방향에 따르면 기초 하부 단면의 재하 직각 방향의 기초 폭은 유지한 채 재하방향의 기초 길이를 증가시키는 방안이 가장 유효한 것으로 판단된다. 특히 Fig. 22와 같이 기초 하부 단면을 직사각형으로 구성하여 선로 방향 기초 폭을 감소시키면, Fig. 2에 나

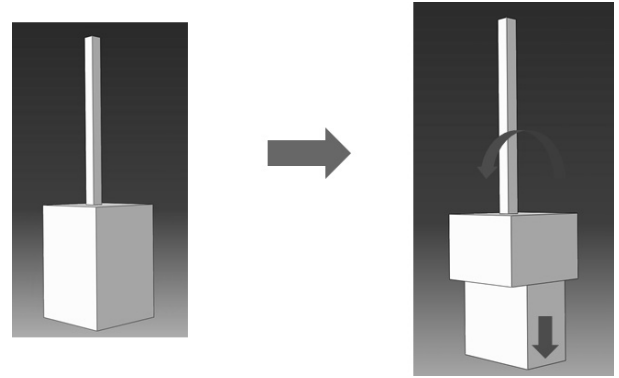


Fig. 22. Schematics of foundation shape optimization

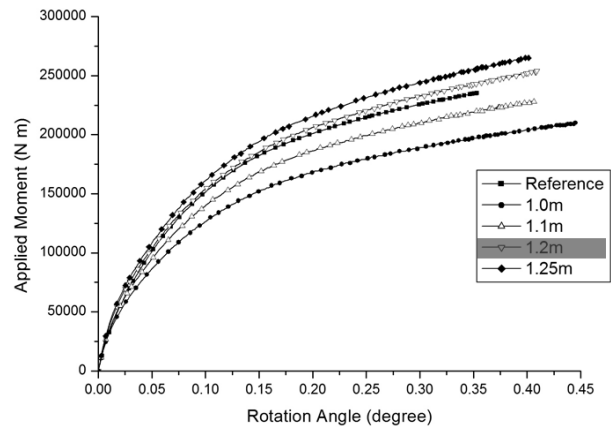


Fig. 23. Moment-rotation angle curves according to the depths of rectangular lower parts of foundations

타낸 굴착부의 안식각 확보를 위해 발생하는 선로 간섭을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다.

위에 기술한 세 종류의 형상 효율화 방향에 따라 1.4m×1.4m×2.0m(W×L×D) 형상의 기초에 대한 단면 효율화를 수행하였다. 이를 위해 Fig. 22와 같이 기초상부 1.0m는 기존 단면(1.4m×1.4m)로 유지하고, 1.0m 아래의 기초 하부는 선로방향으로 긴 직사각형(1.4m×0.8m) 단면으로 기초 길이를 43% 감소시키는 방안을 적용하였다. Fig. 23은 해당 기초 형상에 대하여 기초 하부 직사각형 단면부의 깊이를 각각 1.0m, 1.1m, 1.2m, 1.25m로 한 경우의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸다.

Fig. 23에서 직사각형으로 축소된 기초 하부단면의 깊이를 1.2m로 하여 전체 기초의 근입깊이를 2.2m로 20cm 증가시킨 경우, 기존 정사각형 기초와 유사한 저항모멘트가 발휘되는 것을 알 수 있다. 1.4m×1.4m×2.0m(W×L×D)의 정사각형 단면 기초의 경우 소요되는 콘크리트량은 3.92m<sup>3</sup>이다. 효율화된 단면의 경우 상부 정사각형 단면(1.4m×1.4m×1.0m)의 부피는 1.96m<sup>3</sup>, 하부 직사각형 단

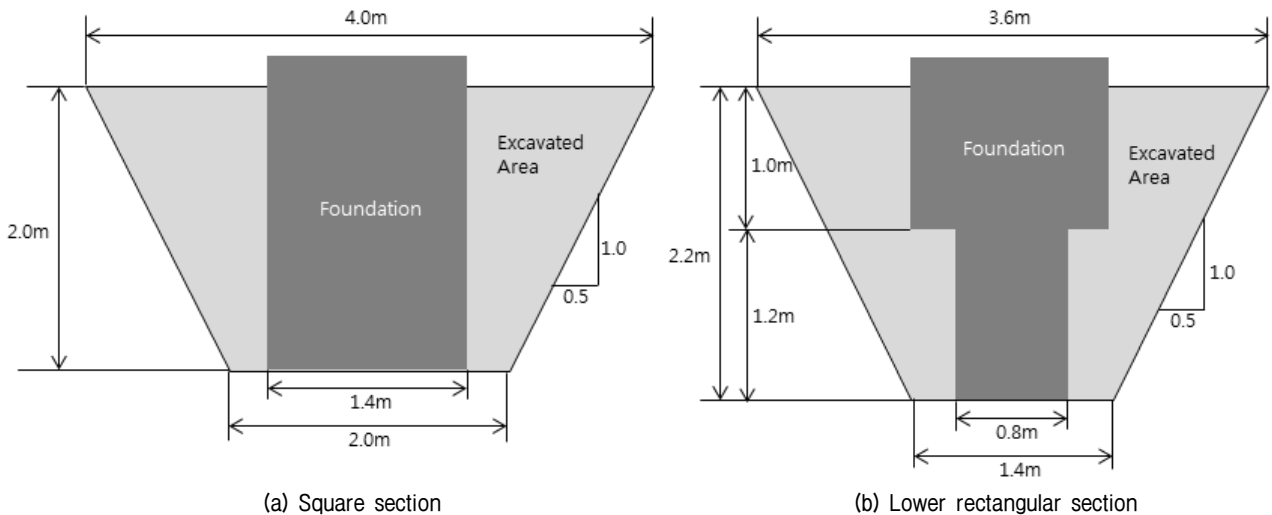


Fig. 24. Comparison of excavation width according to foundation shape

면(1.4m×0.8m×1.2m)의 부피는 1.344m<sup>3</sup>로 전체 3.304m<sup>3</sup>이므로 기존 정사각형 단면 기초에 비해 콘크리트량을 20% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 24에는 터파기 공사기준(3.0m 이하)에 따라 기초 저면 여유폭을 0.3m, 비탈면 기울기를 1:0.5로 하여 굴착하는 경우의 기초 형상에 따른 굴착영역을 나타내었다. 정사각형 균일단면 기초의 경우는 지표에서의 선로 방향 굴착 폭이 4.0m인데 비하여, 하부 단면을 직사각형 형태로 효율화한 경우는 3.6m로 산정되었으며, 굴착 폭을 10% 정도 감소시키는 것이 가능하였으며, 이로써 기초 시공 시 선로에 발생하는 간섭을 효과적으로 저감할 수 있는 것으로 평가되었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 전철주기초의 거동을 예측할 수 있는 수치해석 기법의 개발하고, 다양한 기초 형상에 대하여 해석을 수행함으로써 보다 효율적으로 전철주기초를 시공할 수 있는 방안을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흙과 콘크리트 사이의 경계면을 고려하여 전철주기초의 거동을 모사할 수 있는 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 실물 재하시험 결과와 비교하여 그 유효성을 평가하였다. 해석결과와 실물 재하시험 결과로 나타난 전철주기초의 모멘트-회전각 거동은 초기 강성에서 다소 차이가 있지만 기초의 저항모멘트와 파괴 거동은 비교적 정확하게

예측할 수 있는 것으로 평가되었다. 하중 재하방향 기초 전면부의 상부 지반에서 파괴가 유발되고, 기초 배면에서 지반과 기초가 분리되는 전철주기초의 파괴 거동이 해석결과로 명확하게 나타났다.

- (2) 개발된 수치해석기법의 적용을 통해 기초의 세장비, 직사각형 단면의 하중 재하방향, 기초상부 단면의 확대 등의 조건을 변화시킨 전철주기초의 모멘트 저항거동을 수치해석을 통하여 예측하였다. 해석 결과 기초의 저항모멘트를 증가시키는 가장 효과적으로 방법은 가능한 세장비를 크게 하여 기초의 근입 깊이를 증가시키는 것으로 평가되었으며, 직사각형 단면의 기초를 적용하여 하중재하 방향의 폭은 증가시키고 길이는 감소시키는 방안도 효율적인 것으로 나타났다. 그러나 기초의 상부 폭만을 증가시키는 방법은 그 효과가 크지 않았다.
- (3) 기초 상부의 단면은 유지한 채 기초 하부 단면의 크기를 직사각형 형태로 감소시키고 기초의 근입 깊이를 증가시키는 형상 효율화 방안을 도출하였으며, 이를 통해 기초에 소요되는 콘크리트량을 절감하고 시공 시 선로 간섭을 저감할 수 있는 사례를 제시하였다.
- (4) 제안된 전철주기초 형상 효율화 방안을 적용하면 2019년까지 전철화 예정인 1,500km 이상 구간의 전철주기초 시공과 관련된 국가적인 사업비 절감이 가능할 것으로 기대되며, 향후 제안된 방안의 유효성 검증을 위한 실물 재하시험 및 시공성 평가 등을 포함한 추가 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “트램 인프라 실용화 기술 개발(13RTRP-B067379-01)”과제의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. Balfour Beatty Construction Ltd. (1986), *Report on foundation design for overhead catenary system*. Tuen Mun LRT, Interim report, BBPCL.
2. Bowles, J. E. (1988), *Foundation analysis and design*, 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill
3. Brinch Hansen, J. (1961), “The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces”, *The Danish Geotechnical Institute*, Bulletin No. 12, Copenhagen, pp.1-9.
4. Broms, B.B. (1964), “Lateral resistance of piles in cohesionless soils”, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.90, No.3, pp.79-99.
5. Dickin, E. A. and Nazir, R. (1999), “Moment-carrying capacity of short pile foundations in cohesionless soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol.125, No.1, pp.1-10.
6. Dickin, E.A. and Laman, M. (2003), “Moment Response of Short Rectangular Piers in Sand”, *Computers and Structures*, Vol.81, No.30, pp.2717-2719.
7. Korea Rail Network Authority (2004), *Railway design manual (Electric : Catenary Line)*, Korea Rail Network Authority, Daejeon.
8. Korea Rail Network Authority (2009), *Report on Electrification of Railway Line in 2009*, Korea Rail Network Authority, Daejeon.
9. Korea Transport Institute & KRTC (2009), *Research on master plan of electrification of national railway network*, Ministry of Transport and Maritime Affairs.
10. Kulhawy, F. H., Trautmann, C. H., Beech, J. F., O'Rourke, T. D., McGuire, W., Wood, W. A., and Capano, C. (1983), *Transmission line structure foundations for uplift-compression loading*, Rep. No. EL-2870, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif.
11. Mohammadi, S.D., Nikoudel, M.R., Rahimi, H., and Khamehchiyan, M. (2008), “Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils”, *Engineering Geology*, Vol.101, pp.195-203.
12. UIC/ORE (1957), *Calculation of catenary masts and foundations. Interim Report No. 1*, International Union of Railways/Office for Research and Experiments, Utrecht.
13. Vermeer, P. A. and De Borst, R. (1984), “Non-associated plasticity for soil”, *Concrete and rock*, Heron, Vol.29, No.3, pp.1-65.

Received : August 6<sup>th</sup>, 2013

Revised : October 1<sup>st</sup>, 2013

Accepted : November 7<sup>th</sup>, 2013