

실물 재하시험을 통한 성토사면에 근접한 철도 전철주기초의 저항모멘트 평가

Experimental Evaluation of the Moment Capacity of a Railway Electric Pole Foundation Adjacent to a Fill Slope

이 수 형¹ Lee, Su-Hyung

이 성 진² Lee, Sung-Jin

이 일 화³ Lee, Il-Wha

Abstract

The moment responses of electric pole foundations for a railway were investigated using real-scale load tests. Large overturning moments were applied to two circular rigid piles with a 0.75 m diameter and a 2.5 m embedded depth; the circular rigid piles were installed in an actual railway embankment fill. Two different loading directions-toward the fill slope and toward the track -were applied to evaluate the influence of the fill slope on the moment capacities of the foundations. It was found that the failure of the foundations that were constructed according to Korean railway practices exhibited a sudden overturning pattern without any significant pre-failure displacement. The moment capacity toward the fill slope was less than the moment capacity toward the track by 30%. From the test results, the geometry factor (K), which accounted for the reduction of the moment capacity, due to the fill slope, was 0.7. Moment capacities determined from the load tests were compared with those predicted from three existing design methods, and their applicability was discussed.

요 지

철도선로에 설치되는 전철주기초의 모멘트에 대한 거동을 파악하기 위한 실물 재하시험을 수행하였다. 현행 시공방법에 따라 현장타설방식으로 설치된 직경 75cm, 깊이 2.5m의 원형 전철주기초 2본에 대하여 실제 조건과 동일한 모멘트 위주의 하중을 가하여 기초의 파괴모멘트를 확인하였다. 성토사면이 기초의 저항모멘트에 미치는 영향을 평가하기 위하여 사면방향과 사면반대방향으로 각각 모멘트를 가하였다. 국내 설계기준에 따라 성토지형에 설치된 전철주기초는 파괴 이전까지는 변위가 거의 발생하지 않다가 급격한 전도로 파괴되는 취성거동을 보이는 것을 규명하였다. 성토사면의 영향으로 기초의 파괴모멘트가 30% 정도 감소하는 것으로 평가되었으며, 이를 토대로 전철주기초 설계에서 사면의 영향을 고려하기 위한 지형계수(K)로 0.7을 제안하였다. 또한 실물 재하시험 결과로 나타난 파괴모멘트를 국내의 설계방법의 저항모멘트 산정 결과와 비교함으로써 그 적합성을 평가하였다.

Keywords : Circular rigid pile, Electric pole foundation, Fill, Moment capacity, Railway, Real-scale load test, Slope

1 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5399, Fax: +82-31-460-5025, geoxlee@krrri.re.kr, 교신저자)

2 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)

3 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

우리나라 철도는 1970년대 초반부터 전기에 의하여 열차가 구동되는 전철화가 시작되었으며, 2009년 현재 전체 철도선로 거리 3,434km의 56.4%인 1,938km의 노선이 전철화 되어 있다(Korea Rail Network Authority, 2009). Korea Rail Network Authority(2009)에 의하면 국내철도의 전철화율은 지속적으로 증가하여 2015년에는 전 노선의 73%에 달하여, 향후 1,000km 이상의 노선이 전철화 될 것으로 예측된다. 또한 Korea Transport Institute & KRTC(2009)에 의하면 2019년까지 1,596.3km 구간을 전철화하는 계획을 국가적으로 수립 중에 있다. 따라서 철도의 전력시설물에 대한 합리적인 설계 및 시공을 통하여 국가적인 예산의 절감이 필요한 실정이다.

철도 선로의 전철화를 위해서는 전력공급을 위하여 선로를 따라 가공전선(overhead catenary)을 가설해야 하며, 이를 위해서는 선로 연변에 Figure 1과 같은 전철주와 이를 지지하는 기초가 설치되어야 한다. 전철주 기초는 일반적으로 짧은강체말뚝(short rigid pile) 형태로 수직하중보다는 주로 수평하중에 의하여 발생하는 매우 큰 모멘트에 대하여 전도(overturning)가 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 따라서 일반적인 기초설계와 달리 철도 전철주기초의 설계에서는 기초와 지반사이의

수동토압 분포를 예측하여 기초가 저항할 수 있는 모멘트를 합리적으로 산정하는 것이 중요하다.

아직까지 짧은강체 말뚝의 전도에 대한 저항모멘트 산정법에 대해서 확실하게 규명된 이론이 없기 때문에 현재 전철주기초 설계에는 주로 축소모형시험이나 원심모형시험 결과를 통한 경험적인 방법들이 적용되고 있다(Balfour Beatty Construction Ltd., 1986; Broms, 1964; Hansen, 1961; UIC/ORE, 1957, Dickin and Nazir, 1999). 이들 모형시험의 결과는 크기효과나 응력수준과 관련된 문제로 실제 크기 기초의 저항모멘트 산정에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 보다 합리적이고 정확한 전철주기초의 저항모멘트 산정을 위해서는 실제 크기의 기초에 대한 재하시험이 반드시 필요하다. 그러나 수평하중에 비하여 상대적으로 매우 큰 모멘트를 기초에 재하하기 위해서는 재하점의 기초에 대한 이격거리를 실제에 가깝게 크게 해야 한다. 따라서 일반적으로 수행되는 횡방향 재하시험이 아닌 실제 전철주를 설치하고 전철주 상부에 수평하중을 재하하는 특수한 시험이 필요하다. 또한 철도 선로의 경우 Figure 1과 같이 성토지반에 많이 건설되므로, 대부분 전철주기초의 저항모멘트는 인접한 사면의 영향을 받게 되며 이를 합리적으로 고려하는 것이 매우 중요하나 현재는 경험적인 계수에 의존한 설계가 이루어지고 있다.

본 논문에서는 실제 전철주기초의 저항모멘트를 합리적으로 평가하기 위하여 실물 재하시험을 수행하였다. 성토지반에 위치한 철도 선로에 2개의 실제 크기 전철주를 설치하고, 모멘트 위주의 실제와 가까운 하중 조건으로 기초의 전도 파괴가 발생하는 하중까지 재하하였다. 특히 2개의 동일한 전철주 기초에 대하여 각각 사면방향과 사면반대방향(선로방향)으로 재하함으로써 기초의 저항모멘트에 대한 사면의 영향을 명확히 규명할 수 있도록 하였다. 시험 결과를 토대로 현재 전철주기초 설계에서 사면의 영향을 고려하기 위하여 적용하고 있는 지형계수를 새롭게 제안하였다.

2. 국내 전철주 기초의 설계 및 시공 현황

2.1 전철주 기초에 작용하는 하중의 특성

철도 선로에 설치되는 전철주는 선로의 곡선반경(R)에 따라 20m~60m 간격으로 배치되며 따라서 전철주 하나는 20~60m 길이의 전선 및 이를 고정하기 위하여 부

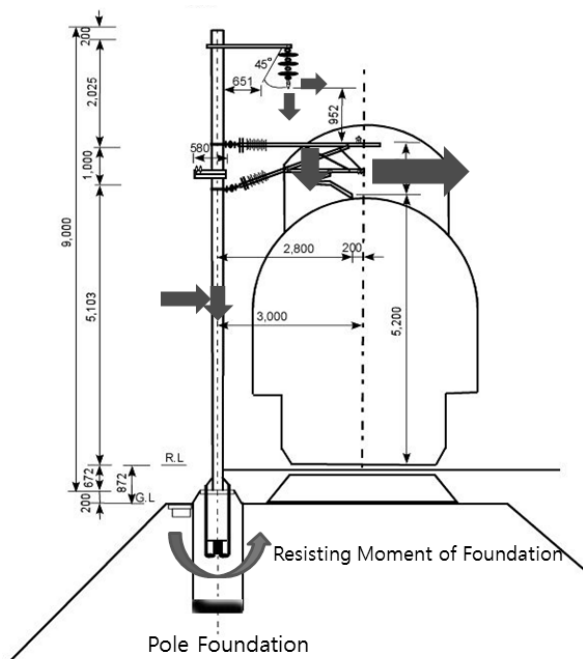


Fig. 1. Schematics of Loads acting on a Pole Foundation of Railroad

Table 1. Types of loads acting on a pole foundation (Korea Rail Network Authority, 2004)

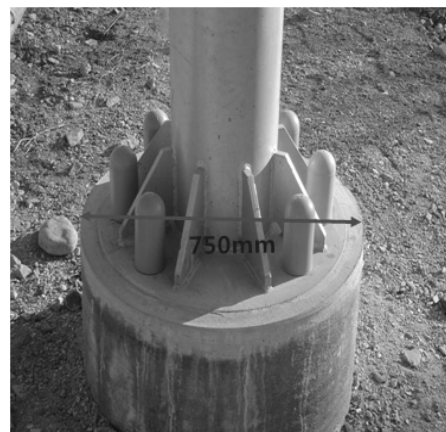
Types of Loads		Details
Horizontal	Wind	Wind pressure against electric cable
		Wind pressure against pole (vertical to railroad)
		Wind pressure against pole (Horizontal to railroad)
		Wind pressure for beam (Horizontal to railroad)
	Horizontal tension at a curved section	Horizontal tension at the standard temperature
		Horizontal tension at $-5[^\circ\text{C}]$
Horizontal tension at the minimum temperature		
Vertical	Self-weight	Electric cables
		Beams
		Poles
		Auxiliary parts
		Workers
	Ice	Ice on electric cables

Table 2. Examples of loads acting on a pole foundation for pole span distance 50 m and radius of curvature (R) 1000 m

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



(a) Rectangular concrete foundation



(b) Circular concrete foundation

Fig. 2. Types of electric pole foundations in Korean railroad

착되는 구성품에 작용하는 각종 하중(자중, 풍하중, 전선의 장력 등)을 지지하여야 한다(Figure 1). Table 1은 철도설계편람(Korea Rail Network Authority, 2004)에서 전기철도 구조물의 설계를 위하여 제시한 전철주에 작용하는 하중의 종류를 나타낸 것이다. Table 2는 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 회전모멘트가 작용하는 것을 알 수 있으며, 특히 풍하중에 의한 모멘트가 70% 정도의 매우 큰 비중

을 차지하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 가장 큰 비중을 차지하는 전선에 작용하는 수평하중이 전철주기초로부터 7m 이상 떨어져 작용하기 때문이며, 따라서 전철주기초는 매우 큰 회전 모멘트를 저항하여 전도(overturning)가 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

2.2 전철주기초의 형태

현재 국내 전철주기초는 Figure 2와 같이 사각형과 원형의 두 가지 형태로 설계 및 시공되고 있다.



(a) Boring machine operating on railroad



(b) Excavated hole for a foundation

Fig. 3. Construction method for circular concrete foundation

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 크기는 철도 설계편람(Korea Rail Network Authority, 2004)에 제시된 폭 900mm~1,400mm, 근입깊이 1,800mm~3,200mm의 기초가 적용되고 있다.

원형기초는 경부고속철도 건설에 처음 도입되기 시작하였으며 굴착장비를 이용한 기계화된 시공이 가능하다. Figure 3a에 나타난 철도 선로를 운행할 수 있는 굴착장비를 이용하여 75cm 직경의 구멍을 정해진 깊이까지 굴착한 후 콘크리트를 현장 타설하는 방법에 의하여 시공되고 있다.

2.3 전철주기초의 설계

2.3.1 국내 전철주기초의 설계 방법

철도설계편람(Korea Rail Network Authority, 2004)에 제시된 전철주기초 저항모멘트 산정 방법은 일본에서 개발된 경험적인 방법을 적용하고 있다. 이 방법에서는 지지력이 양호한 지반조건에 대하여 간편식을 사용하도록 되어있으며, 지반조건이 불명확하거나 연약지반인 경우에는 각종 지반조사를 통해 지반특성을 파악하고 해당 조사에 적합한 경험식을 적용하여 기초의 저항모

Table 3. Values of strength factors (S_0) (Korea Rail Network Authority, 2004)

Maximum loads for a storm	Maximum load for ordinary operations	
	Stable ground	Deformable ground
1.2	1.0	0.75

멘트를 산정한 후 소정의 안전율을 적용한다. 지반의 지지력 측정을 필요로 하지 않는 양호한 지반에 대해서는 아래의 식 (1)을 적용하여 허용 저항모멘트를 산정한다.

$$M_a = Kf S_0 L^2 \sqrt[3]{d^2 \left(1.45 + 0.57 \frac{d^2}{D^2} \right)^2} \quad (\text{tf}\cdot\text{m}) \quad (1)$$

여기서, M_a : 허용 저항모멘트(기초면 중심점에서)

K : 지형계수

f : 형상계수

S_0 : 강도계수

D : 기초 근입깊이 (m)

d : 기초 직경 (m)

식 (1)에서 강도계수(S_0)는 설계하중 조건에 따른 지반조건을 고려하기 위한 계수로서 Table 3의 값을 적용한다.

형상계수(f)는 기초의 형태와 흙막이 거푸집의 사용여부에 따른 기초재료와 흙 사이의 마찰강도 차이를 고려하기 위한 계수로서 Table 4의 값을 적용한다.

지형계수(K)는 성토사면 또는 측구에 의한 지형적인 영향을 고려하기 위한 계수로서 다음의 Table 5에 제시한 값을 적용한다. 이 경우 기초로부터 측구나 사면까지의 이격거리(L)가 기초폭(d) 보다 작은 경우 해당 계수를 적용하게 된다. 성토지반에 설치된 경우 성토사면 방

Table 4. Values of shape factors (f) (Korea Rail Network Authority, 2004)

Shape	Crushed stones		Circular concrete		Rectangular concrete		T shape
	Without a form	With a form	Without a form	With a form	Without a form	With a form	Pouring just after excavation
Shape factor	0.6	0.75	1.0	0.9	1.1	1.0	1.4

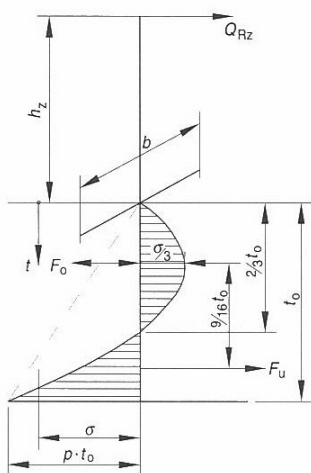
Table 5. Values of geometry factors(K) (Korea Rail Network Authority, 2004)

Geometry	Loading direction	K
Plain or cut		1.0
		1.2
Fill		0.6
		1.0

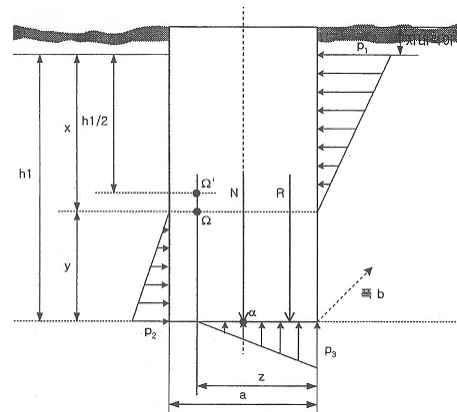
향으로 모멘트가 작용하는 경우와 그 반대편(선로방향)으로 모멘트가 작용하는 경우 각각 지형계수를 0.6과 1.0으로 적용하고 있다. 이는 기초가 사면으로부터 기초 폭보다 작은 거리로 이격되었을 때 사면의 영향에 의하여 저항모멘트가 40% 감소하는 것을 의미한다. 해당 지형계수는 일본에서 사용되는 값으로, 프랑스의 지형계수에 대하여 일본과 프랑스의 토질 차이를 고려하여 결정되었으며, 쉽게 붕괴하지 않는 양호한 흙으로 성토된 경우에 대한 것이다.

2.3.2 국외 전철주기초 설계방법

프랑스(Korea TGV Consortium, 1995)와 독일(Kiessling et al., 2009)의 경우는 Figure 4와 같이 기초에 작용하는 토압분포를 가정하여 기초의 저항모멘트를 산정한다. 전철주기초의 최대 저항모멘트는 Figure 4의 토압분포에서 힘과 모멘트에 대한 평형방정식을 고려하여 산출한 작용 토압이 지반의 한계토압을 초과하는 경우의 모멘트로 결정하고 있다. 한계토압은 프랑스의 경우 지반 조건에 상관없이 0.25MN/m^2 로 가정하고 있으며, 독일의 경우는 아래의 식 (2)와 같이 따라 깊이에 따라 선형으로 증가하는 것으로 가정하고 있다.



(a) Germany (Kiessling et al., 2009)



(b) France (Korea TGV Consortium 1995)

Fig. 4. Assumptions for the distributions of soil pressures acting on a foundation

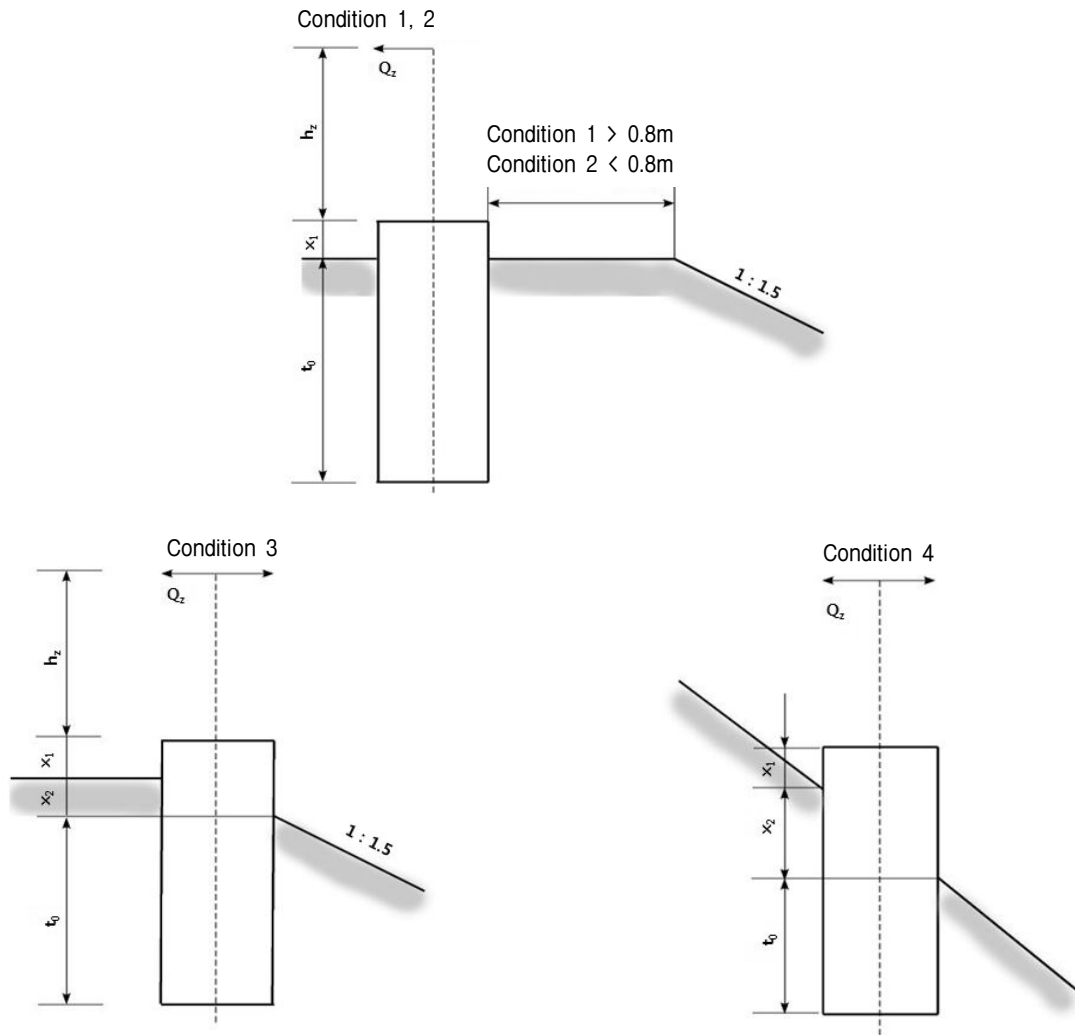


Fig. 5. Geometry conditions of German design method (Kiessling et al, 2009)

$$\sigma_{crit} = 0.125z \text{ (MN/m}^2\text{)} \quad (2)$$

여기서 σ_{crit} 는 한계토압, z 는 지표로부터의 깊이이다.

이와 같이 두 방법 모두 한계토압을 지반조사 결과로부터 구한 지반정수를 근거로 산출하고 있지 않으며 일률적인 값을 적용하고 있다. 이는 전철주기초가 비교적 일정한 조건에 맞추어 조성된 철도노반에 설치되어 특정 수준 이상의 지반조건이 보장되므로 설계의 편의를 위하여 대표적인 값을 일괄적으로 적용하고 있는 것으로 판단된다. 프랑스와 독일의 방법은 토압분포를 가정하고 한계토압과 비교하여 저항모멘트를 산정하는 방식은 동일하지만, 두 방법의 토압분포는 상당한 차이를 나타내고 있으며, 특히 프랑스의 경우는 기초 저면이 받는 토압도 저항모멘트 산정에 고려하고 있다(Figure 4).

독일의 경우 기초가 성토지반위에 설치되는 경우 다음의 Figure 5와 같은 지형 구분에 따라 기초가 사면의 모서리에서 0.8m 이내에 설치되는 경우 기초의 저항모멘트를 20% 감소키는 방법을 적용하여 설계한다. 따라서 독일의 경우는 국내기준 형태의 지형계수로 0.8을 적용하고 있다고 할 수 있다.

프랑스의 경우는 지형조건을 고려하기 위하여 Table 6과 같은 계수를 적용하고 있다. 성토지형의 경우 기초의 중심이 사면으로부터 1.6m보다 크게 이격된 경우 1.3, 작게 이격된 경우 1.0의 지형계수를 적용하고 있다. 따라서 성토사면의 영향으로 저항모멘트가 23% 정도 감소되는 것으로 평가하고 있으며, 국내기준의 형태로 환산하면 지형계수로 0.77(1.0/1.3)을 적용하고 있다고 할 수 있다.

Table 6. Geometry factors for French design method (Korea TGV Consortium, 1995)

Geometry	Sections	K	
		Moment +	Moment -
Fill		1	1
Fill		1.3	1
Plain		1.3	1
Cut		1.5	

3. 전철주기초 실물 재하시험

3.1 시험 개요 및 기초의 시공

본 연구에서는 실제 조건에 가까운 하중 재하를 통해 실제 크기 전철주기초의 파괴를 확인하는 재하시험을 수행하였다. 특히 Figure 6과 같이 성토사면에 근접하여

설치된 동일한 조건의 기초 2분에 대하여 각각 성토사면 방향과 반대방향으로 지형 조건을 변화시켜 재하 함으로써, 성토사면이 기초의 저항모멘트에 미치는 영향을 명확히 파악하는 것이 본 시험의 주된 목적이다.

기초는 Figure 3에 나타난 한국철도시설공단의 굴착장비를 이용하여, 직경 75cm의 원형기초를 2.5m 깊이로 2분 시공하였으며, 이 때 기초 중심이 성토사면으로

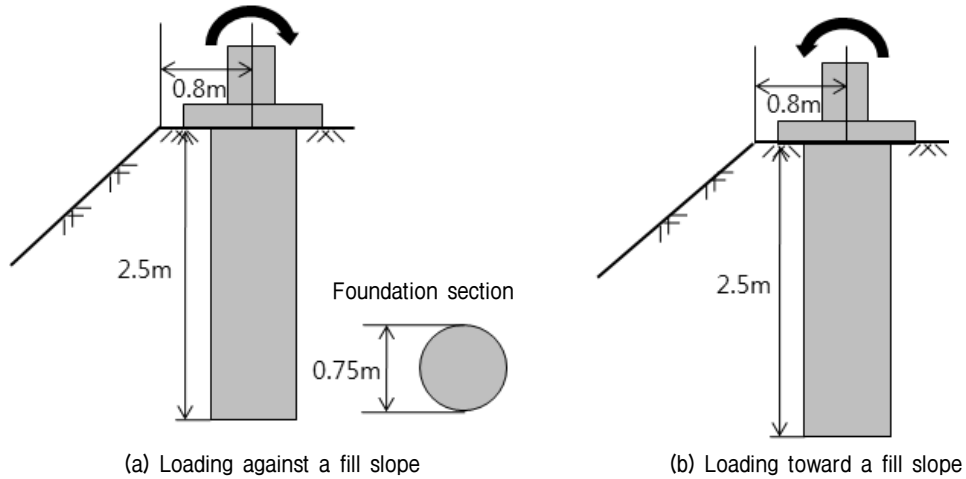


Fig. 6. Type of tests according to loading directions

부터 80cm 이격되게 하였다(Figure 6). 지표 위 기초 상부에는 변위 측정을 위한 기준점 확보를 위하여 가로, 세로 100cm, 두께 20cm의 정사각형 콘크리트구조체를 설치하였다.

3.2 시험 위치 및 지반조건

재하시험은 경부고속철도 고모차량기지의 인입용 철도선로에서 수행되었다. 전철주기초가 설치된 위치는 약 3m 높이로 성토된 선로이다. 해당 지역의 성토에는 고속철도 설계기준(Korea Rail Network Authority, 2005)에서 고속철도 선로의 상부노반으로 적용 가능한 재료로 분류된 GP-GM(실트 및 모래 섞인 입도 불량한 자갈)이 사용되었다.

지반의 강성 및 강도는 LFWD(Light Falling Weight Defletometer)와 동적콘관입시험기(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)를 이용한 현장 시험을 통해 평가하였다. LFWD는 자유낙하 시킨 추로 인해 발생하는 에너지, 하중, 지반 침하 사이의 관계를 이용하여 지반강성을 평가하는 장비로서 크기가 작고 이동이 간편하기 때문에 차량이 접근하기 곤란한 철도 선로에서 많이 적용되고 있다. 본 연구에서 사용된 장비는 Dynatest의 Keros Prima100 Portable FWD이다. 동적콘관입시험은 78.4N의 해머를 575mm의 높이에서 낙하시켜 직경 20mm의 원추를 타격하여 관입되는 깊이를 측정함으로써 지반의 강성 및 강도를 평가하는 방법으로서, 본 연구에서 사용한 장비는 미국 Kessler의 장비로 현장 시험 시 관입깊이는 500mm 이상을 기준으로 하였다.

Table 7. Results of ground investigations

Test type	LFWD	Dynamic cone penetration test	
	Elastic modulus (MPa)	DCP Index (cm)	Internal friction angle (degree)
Results	134	1.3	39.8

Table 7은 재하시험을 위하여 설치된 기초의 주변 지반에 대하여 수행한 LFWD와 동적콘관입시험의 결과로서 10회 이상의 시험결과를 평균한 값이다. Table 7에 제시된 내부마찰각은 1회 타격당 콘의 관입깊이인 DCP Index(DCPI)로부터 Mohammadi 등(2008)이 제시한 아래의 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$\phi = 52.16(DCPI)^{0.13} \text{ (degree)} \quad (3)$$

고속철도 설계기준(Korea Rail Network Authority, 2005)에서는 상부노반 강성조건으로 연직방향재압축변형계수(E_{v2})가 80MPa 이상이 되도록 규정하고 있으며, 해당 재하시험 부지는 LFWD로 산정된 연직방향탄성계수가 134MPa로 이러한 조건을 만족하는 것으로 평가되었다.

3.3 재하 조건

실제 하중조건을 모사하기 위하여 Figure 7과 같이 강철 케이블을 전철주에 연결하고 크레인을 이용하여 인장하였다. 재하 위치는 일반적인 전철선 위치(레일 상면으로부터 약 7m)를 고려하여 기초로부터 높이가 8m인 곳으로 결정하였다.

전철주에 전달되는 하중은 Figure 7과 같이 케이블에

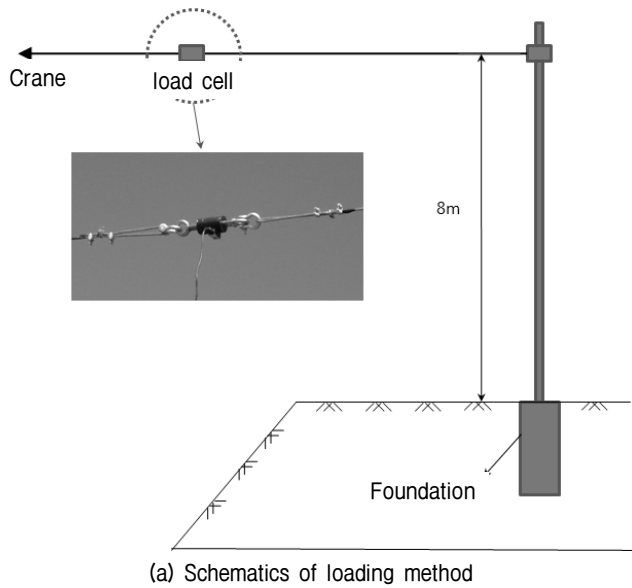


Fig. 7. Loading method using a crane

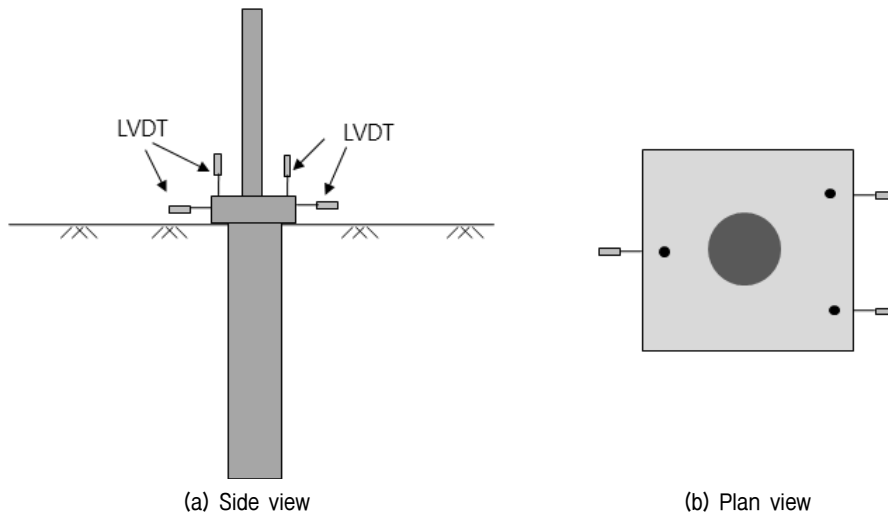


Fig. 8. Locations of LVDT

장착된 로드셀을 이용하여 측정하였다. 로드셀은 50kN 까지 측정이 가능한 제품을 사용하였다. 하중은 기본적으로 크레인의 인장하중을 단계별로 0.5kN씩 증가시키는 방법으로 재하하였다. 크레인을 통한 정확한 하중 조절이 어렵기 때문에 측정된 하중을 확인하며 크레인 하중을 서서히 증가시켰으며 0.5kN 이상 하중이 증가하면 하중 증가를 멈추고 계측된 값이 안정될 때까지 하중을 유지하였다. 하중 재하 시에는 모멘트-회전각 곡선을 실시간으로 작성하여 기초의 거동을 파악하였으며, 기초의 파괴가 충분히 발생할 정도까지 하중을 재하하여 기초의 파괴모멘트를 확인할 수 있도록 하였다.

3.4 변위 계측 방법

작용 모멘트에 따른 기초의 변위를 측정하기 위하여 6개의 전자식변위계(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였다. 사용된 LVDT는 일본 KYOWA 사의 스트레인게이지형 제품(DTH-A-50)으로 최대 50mm 까지 측정 가능한 센서이다. Figure 8과 Figure 9는 전자식변위계의 설치 위치를 나타낸 것으로 하중 작용방향에 대하여 전면부는 기초 상면에 2개, 기초 측면에 2개씩 4개를 설치하였고, 후면부에는 기초 상면과 측면에 각각 1개씩 설치하였다. 기초 상면부의 전자식변위계는 기초의 수직변위 측정을 통한 회전각을 산정을 위하여

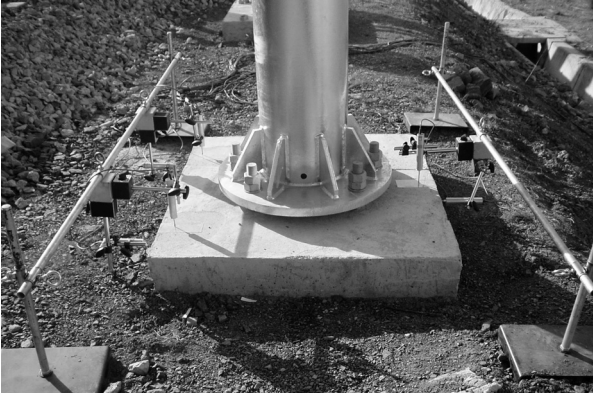


Fig. 9. LVDTs for the measurements of foundation displacements

설치하였으며, 기초 측면부의 전자식변위계는 기초의 수평변위를 측정하기 위하여 설치하였다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 파괴 거동

Figure 10은 시험결과로 나타난 기초머리에 작용하는 모멘트에 대한 회전각 곡선이다. 사면방향으로 재하한 경우와 사면 반대방향인 선로방향으로 재하한 경우 모두 파괴 이후에 급격한 회전각의 증가와 함께 모멘트가 감소하는 취성 거동을 나타내었다. Figure 11은 Dickin & Laman(2003)이 조밀한 사질토에 대한 원심모형시험 결과로 제시한 원형기초의 회전각-모멘트 곡선으로, 뚜렷한 파괴하중이 발생하지 않고 회전각의 증가에 따라 모멘트가 지속적으로 증가하는 현상이 나타났으며, 이

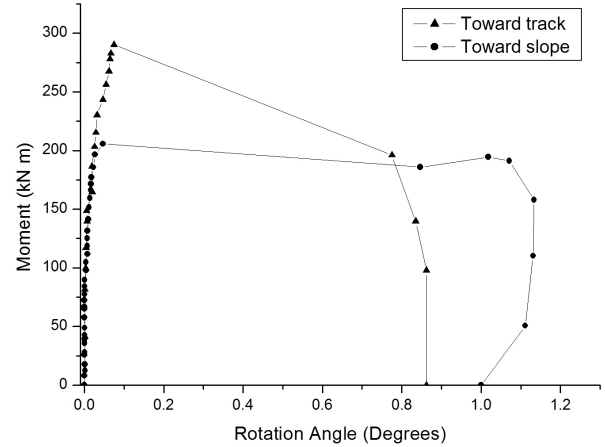


Fig. 10. Moment-rotation curves from the field load tests

경우 전철주의 사용성을 확보할 수 있는 특정 회전각 (2°)에서의 모멘트를 저항모멘트로 규정하고 있다. 그러나 본 연구의 실물 재하시험에서는 모멘트의 증가에 따라 급격히 회전각이 증가하는 파괴모멘트가 극명하게 나타났다. 이러한 파괴 거동의 차이는 모형실험에서 실제 국내 철도현장의 성토재료, 다짐도, 응력수준 등의 지반조건을 적절히 구현할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 2005년 철도 설계기준이 개정된 이후 철도노반은 본 시험이 수행된 고모보수기지에 적용된 수준의 재료 및 다짐도로 조성되고 있으므로, 일반적인 철도 선로에 설치된 전철주기초는 본 실물 재하시험의 결과와 유사하게 특정 모멘트에서 급격한 기초의 전도가 발생하는 취성거동의 파괴를 보일 것으로 예상된다.

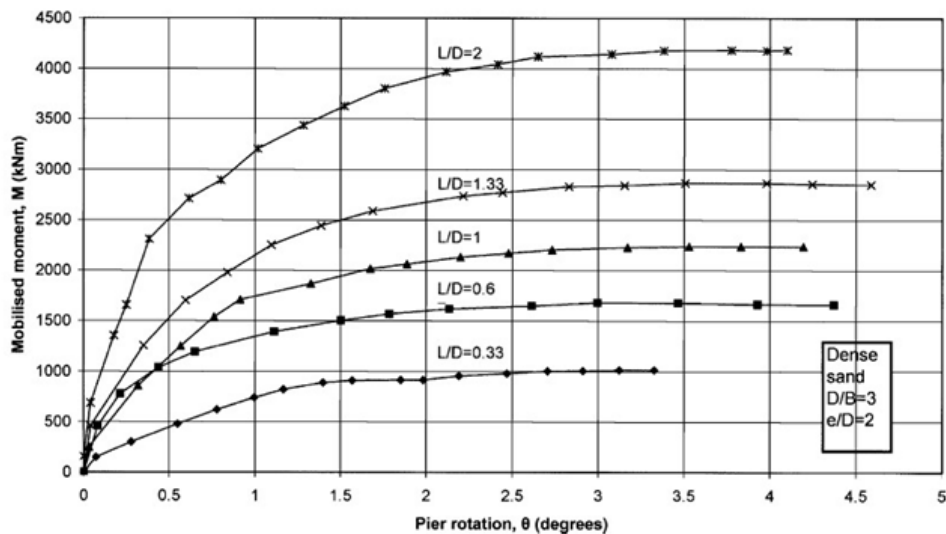


Fig. 11. Moment-rotation curves from the centrifuge model tests (Dickin and Laman, 2003)

Table 8. Failure moments and design capacities obtained from the load tests

	Failure moments from field load tests (kN·m)	Design moment capacities (kN·m)		
		Korean method	French method	German method
Against track	215.5	47.7(4.3)*	92.3(2.2)*	77.6(2.7)*
Toward track	290.1	79.5(3.6)*	120.1(2.4)*	97.0(3.0)*

*Safety factors obtained from the failure moments

4.2 설계 방법별 저항모멘트의 평가

실물 재하시험 결과에서 회전각이 급격히 증가하면서 모멘트가 감소하는 현상이 발생하였으므로 기초의 파괴가 발생하는 모멘트의 명확한 산정이 가능하였다. 사면방향으로 재하한 경우 205.7kN·m, 선로방향으로 재하한 경우는 290.1kN·m로 각각 기초의 파괴모멘트가 산정되었다. Table 8은 재하시험 결과로 산정된 기초의 파괴모멘트와 국내외 설계방법으로 산정한 기초의 저항모멘트를 비교하여 정리한 것이다.

Table 8의 괄호 안에는 각 설계방법에 의하여 산정된 저항모멘트를 재하시험 결과로 산정된 파괴모멘트와 비교하여 산정한 안전율을 나타내었다. 프랑스와 독일의 설계방법은 각각 2와 3에 가까운 안전율을 나타내었으며, 하중재하방향에 따라 비교적 일관된 안전율을 보여서 지형의 영향이 적절하게 반영되고 있는 것으로 평가되었다. 반면 국내 설계방법의 경우는 안전율이 4에 가까운 값으로 상대적으로 보수적인 설계가 이루어지고 있는 것을 알 수 있으며, 하중재하방향에 따른 안전율의 차이도 0.7 정도로 크게 나타나 지형의 영향도 과대평가하고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 비교적 일관된 결과를 나타낸 프랑스와 독일의 설계방법도 가정된 토압분포 등이 매우 상이하므로, 각 방법에 적용되고 있는 저항모멘트 산정이론의 적합성에 대한 명확한 평가는 불가능 하였다. 따라서 향후 파괴 시 기초면에 작용하는 토압분포의 측정이 가능한 재하시험을 수행하고, 그 결과를 토대로 한 보다 합리적인 기초의 저항모멘트 산정 이론의 개발이 필요하다.

4.3 발생 수평변위

파괴가 발생하기 직전까지 발생한 수평변위는 사면 방향으로 재하한 경우와 반대방향으로 재하한 경우에 대하여 각각 0.98mm, 1.17mm로 1mm 전후의 매우 작은 값을 나타내었다. 따라서 파괴하중 이전 사용하중 수준

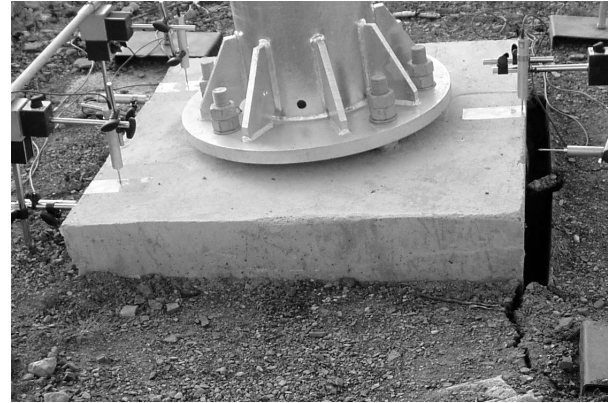


Fig. 12. Horizontal displacement after the foundation failure

에서의 기초에 발생하는 수평변위는 전철주의 사용성에 전혀 영향을 미칠 수 없는 정도인 것으로 평가되었으며, 철도선로에 설치된 짧은 강제말뚝의 지지력 검토에서 수평변위는 상대적으로 설계 시 중요 고려 대상이 아닌 것으로 판단된다. 이는 일반적인 중간길이 이상의 횡방향 말뚝에서 수평변위가 매우 중요한 설계요소인 것과 상반된다. 파괴 이후에는 Figure 12와 같이 재하 반대 방향의 기초 측면부에 지반과 기초사이에 큰 간격이 발생하였으며, 3cm 이상의 큰 잔류수평변위가 발생하여 기초의 사용성이 완전히 상실되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 국내 철도선로에 설치된 전철주 기초의 경우 사용하중에서의 변위 보다는, 기초의 전도 파괴에 대한 저항모멘트를 가장 중요한 설계 요소로 선정해야 한다는 것을 알 수 있다.

4.4 지형계수(K)의 평가

Table 9는 국내외 설계방법의 성토지형에서 사면 영향 고려 방법의 적합성을 평가하기 위하여 산정한 지형계수로, Table 8에 제시된 사면 방향으로 재하한 경우의 파괴 또는 저항모멘트를 선로방향으로 재하한 경우의 값으로 나누어 구한 것이다. 즉 사면의 영향을 고려하기 위하여 기초의 저항모멘트를 얼마나 감소시켜야 하는지 그 정도를 나타낸 값이다.

Table 9. Comparison of geometry factors between field load test and design method

	Failure moments from field load tests	Design moment capacity		
		Korean method	French method	German method
Geometry factor (K)	0.71	0.60	0.77 (1/1.3)	0.80

재하시험 결과로 산정된 지형계수는 0.71로 사면의 영향으로 기초의 파괴모멘트가 29% 감소하는 것으로 나타났다. 프랑스와 독일의 경우는 각각 0.77과 0.8로 재하시험결과보다 다소 큰 지형계수를 적용하고 있다. 반면 국내에서는 재하시험의 결과나 국외의 방법보다 작은 0.6을 지형계수로 적용하고 있다. 따라서 현재 국내에서 적용하고 있는 설계방법은 상대적으로 보수적인 것으로 판단되며, 본 연구의 실물 재하시험 결과나 국외 설계기준을 반영하여 성토지반에서 사면의 영향을 고려하기 위한 지형계수를 상향 조정하여 0.7로 적용하는 방안이 적합한 것으로 판단된다. 그러나 해당 지형계수는 국내의 철도선로에 설치된 전철주기초에 적합한 것으로, 다른 적용 분야에 대해서는 본 연구와 같은 실물 재하시험을 통해 적절한 지형계수를 평가하는 것이 반드시 필요하다. 또한 사면이 기초의 저항모멘트에 미치는 영향은 기초의 사면으로 부터의 이격거리, 사면의 경사, 기초의 깊이 및 형상, 지반의 다짐정도 등에 따라 변화하므로 향후 이와 관련된 해석적인 연구도 함께 수행되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 실물 재하시험을 통해 철도선로에 설치된 전철주기초의 파괴거동을 파악하고 성토사면이 저항모멘트에 미치는 영향을 규명하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 성토 지형에 건설된 철도선로에서 현재 시행되고 있는 시공방법에 따라 2분의 원형기초와 전철주를 시공하였다. 모멘트 위주의 실제 하중조건을 재현한 실물 재하시험을 수행하였으며, 사면 방향과 사면 반대방향으로 각각 기초가 완전히 파괴될 때까지 재하함으로써 사면이 전철주기초의 저항모멘트에 미치는 영향을 명확히 평가할 수 있도록 하였다.
- (2) 고속철도 설계기준에 의하여 건설된 성토지형의 철도선로에서, 전철주기초는 사용하중 수준에서는 회전이나 변위가 거의 발생하지 않다가 파괴로 인해

급격히 전도되는 형태로 거동하는 것이 규명되었다. 따라서 전철주기초에 대해서는 일반 말뚝기초의 횡방향 변위를 고려한 안정성 평가방법과는 다른 전도파괴를 전제로 한 지지력 관점의 안정성 평가가 필요하다.

- (3) 실물 재하시험 결과로 부터 산정된 파괴모멘트를 통해 국내외 설계방법의 적합성을 평가하였다. 국내에서 적용하고 있는 경험적인 방법은 전철주기초의 저항모멘트를 안전율 4 정도로 보수적으로 평가하고 있는 것으로 나타났다. 독일과 프랑스에서 사용되고 있는 방법으로는 각각 안전율 2와 3 정도의 비교적 일관된 저항모멘트 산정이 가능하였으나, 두 방법에서 가정하고 있는 기초에 작용하는 토압 분포는 상당한 차이가 있다. 따라서 향후 전철주기초에 대한 합리적인 설계방법의 개발을 위해서는 파괴 시 기초면에 작용하는 토압분포를 규명하기 위한 추가 연구가 필요하다.
- (4) 성토사면 방향으로 재하한 경우 그 반대방향인 선로방향으로 재하한 경우에 비해 파괴모멘트가 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 현행 설계방법에서 사면에 의한 저항모멘트 감소효과로 국내방법은 40%, 프랑스와 독일 방법은 각각 23%와 20% 정도를 예측하고 있다. 본 연구에서는 실물 재하시험 통해 이러한 지형의 영향을 실제적으로 평가하였으며, 그 결과를 토대로 국내 철도노반에서 사면의 영향을 고려하기 위한 지형계수로 0.7을 적용하는 것을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업 “무가선 저상트램 에너지인프라 개발(11PURT-B053833-03)” 과제의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Balfour Beatty Construction Ltd. (1986), *Report on foundation design for overhead catenary system*, Tuen Mun LRT, Interim report, BBPCL.
2. Brinch Hansen J. (1961), "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", *The Danish Geotechnical Institute*, Bulletin No.12, Copenhagen, pp.1-9.
3. Broms B. B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", *J of Soil Mech and Found Eng Div*, ASCE, 90, pp.79-99.
4. Dickin E. A and Nazir R. (1999), "Moment-carrying capacity of short pile foundations in cohesionless soil", *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE, 125, pp.1-10.
5. Dickin E. A. and Laman M. (2003), "Moment Response of Short Rectangular Piers in Sand", *Computers and Structures*, 81, pp.2717-2719.
6. Kiessling, F, Puschmann, R and Schmieder, A. (2009), *Contact lines for electric railways : planning, design, implementation*, Publicis publishing, Eriangen.
7. Korea Rail Network Authority (2004), *철도설계편람 (전철전력판·전차선)*, Korea Rail Network Authority, Daejeon.
8. Korea Rail Network Authority (2005), *고속철도 설계기준, 노반편*, Korea Rail Network Authority, Daejeon.
9. Korea Rail Network Authority (2009), *2009년도 철도 전철화율 산정 보고*, Korea Rail Network Authority, Daejeon.
10. Korea TGV Consortium (1995), *Basic Environmental Data for Catenary Design*. KTC.
11. Korea Transport Institute & KRTC (2009), *국가철도망 전철화 종합 계획 수립을 위한 연구*, Ministry of Transport and Maritime Affairs.
12. Mohammadi S. D., Nikoudeh 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*, 101, pp.195-203.
13. UIC/ORE (1957), *Calculation of catenary masts and foundations. Interim Report No. 1*, International Union of Railways/Office for Research and Experiments, Utrecht.

(접수일자 2011. 9. 5, 심사완료일 2012. 6. 19)