짧은말뚝의 전도 파괴 시 작용하는 토압분포

Earth Pressure Distribution on Short Pile during Overturning Failure

이수형* · 이성진** · 이성혁*** · 이진욱*** · 이승현****

Lee, Su Hyung · Lee, Sung Jin · Lee, Seong Hyeok · Lee, Jin Wook · Lee, Seung Hyun

Abstract

Earth pressures acting on a short rigid foundation during overturning failure were measured by a real-scale load test. A cast-in-place concrete foundation with square section of 1.0 m width and 2.2 m embedded depth was equipped with 11 earth pressure cells. Moment was applied to the pole supported by the foundation until overturning failure occurred. Earth pressure distribution between the foundation and soil was compared with those from the existing theories to verify their validities. In the measurement result, increase of earth pressure on the upper foundation was found in comparison with the theories, that was caused by the soil compaction at the ground surface. A Simplified distribution of vertical soil pressure on the foundation for the reasonable design was proposed.

Key words : Earth pressure, Short rigid foundation, Overturning moment, Real-scale load test

요 지

모멘트에 의한 전도로 파괴되는 짧은말뚝에 작용하는 연직토압분포를 측정하기 위한 실험 재하실험을 수행하였다. 굴착 후 거푸집을 설치하여 콘크리트를 현장타설하고 되메우는 방식으로 설치된 단면 1.1 m×1.1 m, 근입깊이 2.2 m의 기초에 11개의 토압계를 설치하고 모멘트 하중을 가하여 기초를 전도시키는 실험을 수행하였다. 측정된 흙과 기초 사이에 발생하는 토압의 분포를 기존에 제시된 이론과 비교 분석하여 그 유효성을 평가하였으며, 지표 부분에 다짐이 이루어진 경우 이론에 의해 예측된 것보다 더 큰 토압이 기초 상부에 작용하는 것을 발견하였다. 계측된 토압을 적용한 합리적인 설계가 가능할 수 있도록 기초에 작용하는 연직토압에 대한 단순화된 분포를 제안하였다.

핵심용어 : 전도모멘트, 짧은말뚝, 연직토압분포, 실험재하실험

1. 서 론

표지판과 철도의 전철주 기초로 많이 이용되는 짧은말뚝 수직하중에 저항하는 일반적인 기초와 달리 매우 큰 모멘트에 저항한다. 특히 철도 선로에 전력공급을 위하여 설치되는 전철주는 선로의 곡선반경에 따라 20 m~60 m 길이의 전선 및 이를 고정하기 위하여 부착되는 구성품에 작용하는 풍하중에 저항해야한다. 이들 하중은 기초로 부터 7m 이상 떨어져 작용하기 때문에 전철주기초는 매우 큰 회전 모멘트를 저항하여 전도(overturning)가 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 따라서 일반적인 얇은기초나 말뚝기초의 횡방향에 대한 거동

과 달리, 전철주기초의 경우는 기초 전면과 배면에 각각 작용하는 토압 분포로 생성되는 모멘트를 통해 전철주의 전도에 대하여 저항하게 된다. 짧은말뚝에 작용하는 토압분포에 대해서는 다양한 이론이 제시되어 있으나(Kiessling *et al.*, 1999; Korea TGV Consortium, 2002; Brinch Hansen, 1961; Broms, 1964; Reese *et al.*, 1974; Prasad & Chari, 1999, Zhang *et al.*, 2005) 실제 크기의 기초가 전도되는 경우의 토압분포가 제시된 바는 없다. 본 연구에서는 실험크기의 전철주기초에 대한 모멘트 재하실험을 통해 측정된 흙과 기초 사이의 연직토압분포를 제시하고, 이를 기존 이론들과 비교함으로써 전철주기초의 합리적인 설계를 위한 이론적 토대를

*정회원. 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 선임연구원(E-mail: geonlee@krii.re.kr)

Member. Senior Researcher, Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute

**한국철도기술연구원 고속철도연구본부 선임연구원

Senior Researcher, High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

***정회원. 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 책임연구원

Member. Principal Researcher, High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

****교신저자. 정회원. 선문대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-41-530-2328, Fax: +82-41-530-2328, E-mail: shlee02@sunmoon.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil Engineering, Sunmoon University

마련하고자 한다.

2. 짧은말뚝에 작용하는 토압이론

짧은말뚝이 전도모멘트를 받는 경우 기초에 작용하는 토압 분포에 대한 이론으로는 독일과 프랑스에서 철도의 전철주기 초 설계에 적용하고 있는 것이 대표적으로 Fig. 1과 같은 분포를 제시하고 있다.

독일의 경우는 포물선의 토압분포를 가정하고 있으며, 프랑스의 경우는 기초와 흙 사이의 상대변위에 따라 토압이 증가한다는 가정을 전제로 기초의 회전 중심으로부터의 거리에 선형적으로 증가하는 토압분포를 가정하고 있다.

Fig. 2에는 Zhang(2005) 등이 모형실험 및 이론분석 등을 통해 현재까지 개발된 이론을 정리하여 제시한 토압 분포를

(a) Germany, Kiessling et al. (1999)

(b) France, Korea TGV Consortium (2002)

Fig. 1. Assumptions for the Distributions of Soil Pressures Acting on a Foundation

Fig. 2. Earth Pressure Distributions on Short Rigid Foundations due to Overturning Moment, Zhang (2005)

나타내었다.

Fig. 2에 나타난 모형실험을 기초로 한 토압분포는 Fig. 1에 나타난 프랑스 및 독일의 이론적인 토압분포와는 많은 차이를 나타내고 있으며, 따라서 이론적인 공식 유도 of 한계성을 유추할 수 있다.

가장 최근의 토압분포 이론은 기존의 결과를 모두 통합하여 분석한 Prasad & Chari(1999)가 제시한 바 있다. Fig. 3에 나타난 이 이론에서는 기초 전면부에서 발생한 최대 토압의 1.7배가 되는 토압이 기초 후면부에서 발생하며, 전면부 최대 토압은 회전 중심까지 깊이의 0.6배 되는 지점에서 발생하는 분포를 제시하고 있다. 이 이론에서는 기초 전후면부에 작용하는 연직토압 뿐만 아니라 측면에 발생하는 마찰력의 분포도 함께 제시하고 있다.

그러나 제시된 토압분포는 기초의 폭에 따라 일정하지 않으며, 특히 원형기초의 경우는 기초 단면의 곡률로 인해 정확한 연직응력의 측정이 불가능하다. Fig. 4는 Smith(1987)가 제시한 원형기초의 단면에 작용하는 토압 분포로, 각형기초와 달리 최대 연직토압은 기초 중심부에서 발생하고, 곡률로 인해 주변으로 갈수록 토압이 감소하는 분포를 보인다. Briaud와 Smith(1983)는 원형기초의 경우 최대 연직토압에 대한 평균 연직토압의 비를 0.8로 제시하였다. 사각형 단면

Fig. 3. Earth Pressure Distributions on Short Rigid Pile due to Overturning Moment (Prasad & Chari, 1999)

Fig. 4. Earth Pressure Acting on a Circular Pile (Smith, 1987)

기초의 경우는 얇은기초에서의 접촉압 분포와 마찬가지로, 사질토 지반에서는 기초 폭방향으로 중심부에서 가장 큰 토압이 발생하고, 점성토 지반에서는 기초 폭 외곽부에서 가장 큰 토압이 발생할 것으로 판단된다.

이와 같이 지금까지 전도모멘트를 받는 짧은 말뚝에 발생하는 토압분포와 관련된 다양한 이론이 제시되었으며, 제시된 토압의 크기는 기초 폭에 대한 평균적인 값으로 봐야 하며, 특히 기초에 작용하는 마찰력에 대한 고려여부에 따라 그 크기를 다르게 평가해야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 실물기초 모멘트 재하실험

3.1 실험 개요

모멘트 재하를 통해 실제 크기 전철주기초가 전도하는 경우 기초에 작용하는 연직토압을 측정하는 실험을 수행하였다. 기초는 대표적인 철도 전철주기초의 크기인 폭 1.1 m의 정사각형 단면으로 근입 깊이가 2.2 m 되도록 시공하였다. 지반을 굴착한 후 거푸집을 설치하고, 콘크리트를 현장타설 한

Fig. 5. Locations of Earth Pressure Cells

(a) Front face

(b) Back face

Fig. 6. Installation of Earth Pressure Cells

후 되메우는 방식으로 기초를 시공하였다. 되메우기는 시방기준에 따라 층별 두께 30 cm 이내로 충분한 다짐이 이루어지도록 실시하였다. 거푸집 제거 후 양생이 완료된 후 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 11개의 토압계를 볼트로 고정된 철제 지지물을 이용하여 기초에 부착하였다.

기초의 회전점이 중심 아래에 있는 것을 감안하여 Fig. 5와 같이 모멘트 작용방향의 기초 전면부에는 상부에 6개, 후면부에는 하부에 5개의 토압계를 각각 20 cm 간격으로 설치하였다. 토압계는 전기저항식으로 셀직경이 10 cm이며, 용량이 20 kPa과 50 kPa인 제품을 각각 4개, 7개씩 사용하였다.

3.2 지반조건

재하실험은 한국철도기술연구원내에서 수행되었다. 해당 지역의 지반은 통일분류법으로 GP-GM(실트 및 모래 섞임 입도 불량한 자갈)로 분류되는 흙으로 구성되어 있다. 지반의 강성 및 강도는 LFWD(Light Falling Weight Defletometer)와 동적콘관입시험기(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)를 이용한 현장 실험을 통해 평가하였으며, Table 1에 측정된 값을 나타내었다.

Table 1. Results of ground investigations

LFWD	Dynamic cone penetration test	
Elastic modulus	DCP Index	Friction angle
44 MPa	2.3 cm	34.3°

3.3 재하조건 및 계측

모멘트 위주의 하중조건을 모사하기 위하여 Fig. 7과 같이 기초가 지지하고 있는 전철주에 강철 케이블을 연결하고 크레인을 이용하여 인장하였다. 재하 위치는 일반적인 전철선

Fig. 7. Moment Loading Method (KRRI, 2010)

(a) Side view

(b) Plan view

Fig. 8. Locations of LVDT

위치(레일 상면으로부터 약 7 m)를 고려하여 기초로부터 높이가 8 m인 곳으로 결정하였다. 전철주에 작용하는 인장력은 케이블에 부착된 로드셀을 이용하여 측정하였으며, 약 0.5 kN 씩 단계별로 재하하여 기초가 완전히 전도될 때까지 하중을 증가시켰다.

기초의 변위를 측정하기 위하여 6개의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하였으며, Fig. 8과 같이 기초의 수직, 수평변위 뿐만 아니라 기초의 회전각도 측정이 가능하도록 배치하였다. 실험 재하실험의 자세한 사항은 Korea Railroad Research Institute(2010)가 제시하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 기초의 모멘트-회전 거동

Fig. 9는 재하실험 결과로 나타난 모멘트-회전각 곡선으로, 기초의 항복은 회전각 0.02도 정도에서 발생하였다. 또한 기초가 항복한 이후에도 모멘트가 지속적으로 증가하는 회전각 경화현상이 발생하였으며, 항복 전도모멘트는 약 100 kN·m로 나타났다.

Fig. 9. Moment-rotation Angle Curve

4.2 토압 측정결과

Fig. 10은 항복 직전에 측정된 재하에 의해 발생한 토압을 나타내며, 비교를 위하여 Fig. 10에는 Prasad & Chari (1999)가 제시한 이론으로 예측한 토압분포를 함께 나타내었다. 파괴시의 토압분포는 전면부에는 사다리꼴, 후면부에는 삼각형 분포의 토압이 발생하였으며, 기초 상부로부터 1.4 m 깊이를 중심으로 회전한 것으로 나타났다. 기초 전면부 상부에서의 토압은 깊이별로 일부 증감이 발생하였으며, 이는 30 cm 단위의 층별 다짐 영향으로 각 다짐층 상부와 하부의 다짐도 차이로 발생한 것으로 보인다.

기초상부 전면부에 발생한 최대토압은 17.9 kN/m²으로 기초상부로부터 약 0.2 m 깊이에서 나타났으며, 기초상부로부터 0.6 m 지점에서 이와 동일한 17.9 kN/m²의 토압이 발생하였다. 기초하부 후면부에 발생한 토압은 2 m 깊이에서 26.4 kN/m²으로 나타났으며 발생토압이 깊이에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하면 기초 근입깊이인 2.2 m에서 약 34 kN/m²이

Fig. 10. Earth Pressure Distributions

될 것으로 예측된다. 즉 기초 전면부 토압의 약 1.9배의 토압이 기초 저면부에서 발생하는 것으로 평가되었으며, 이는 Prasad & Chari(1999)가 제시한 1.7과 유사한 것으로 나타났다. 즉 기초 하부에서 측정된 토압분포는 기존 이론으로 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 평가되었다.

기초 상부의 토압은 이론으로 예측된 것과 다소 상이하게 나타났는데, 이는 이론식에서 깊이에 따른 구속압에 따라 선형적으로 증가하는 지반의 강성과 강도를 고려하고 있는 반면에, 실험 대상 기초는 되메우기 방식으로 시공되어 비교적 다짐작업이 용이한 지표에서의 강성이 크게 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 지반의 다짐 없이 항타 등의 방법으로 설치된 기초의 경우는 기존의 이론과 같이 지표 부근에서 토압이 작은 삼각형태의 토압분포가 발생하지만, 기초를 설치한 후 주변지반을 다짐에 의하여 되메운 경우는 지표 부근의 토압이 기존 이론보다 더 크게 발생하는 것으로 평가되었다. 그러나 제시된 결과는 1회의 실험으로 측정된 것으로 신뢰성에 한계가 있으며, 특히 항타를 통하거나, 철도 전철주기초의 경우와 상이한 다짐에너지나 지반조건에서 시공된 경우에 대해서는 향후 본 연구와 유사한 추가연구를 통해 토압분포 특성을 파악해야 할 것이다.

측정된 토압을 기초폭에 대한 평균값으로 보고 계산한 모멘트와 수평하중의 합력은 각각 실험에서 기초에 모멘트와 수평하중에 비해 작은 것으로 나타났으며, 따라서 기초 전면이나 후면부에 작용하는 수직 토압 이외에 기초 측면에 작용하는 마찰력 또는 기초 저면에 작용하는 수직 토압이 기초의 모멘트에 대한 저항 거동에 상당한 역할을 하고 있으며, 기초의 저항모멘트 이들에 대해서도 반드시 고려해야 하는 것으로 판단된다.

4.3 설계를 위한 연직토압분포의 제안

실험 결과로 측정된 Fig. 10의 결과를 단순화 하면 Fig. 11과 같이 설계에 적용 가능한 연직토압분포의 도출이 가능하다. Fig. 11에 제시된 토압분포의 특징은 지표에서 회전중

Fig. 11. Simplified Earth Pressure Distribution for Design

심 깊이(x)의 절반인 $0.5x$ 까지 기초상부에작용하는 최대토압(p)이 발생하는 것으로 가정하였으며, 그 이후는 회전중심까지 선형적으로 토압이 감소한다. 또한 기초 하부에서는 회전중심부터의 거리(y)에 따라 토압이 증가하여 상부에서 발생한 최대토압의 2배까지 이르는 것으로 가정하였다.

Fig. 11의 분포를 적용하면 기초에 작용하는 연직토압의 분포를 비교적 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 제시된 결과는 기초 측면에 작용하는 토압의 깊이에 따른 상대적인 분포에 국한되어 있으며, 기초 폭에 따라 변화하는 연직응력, 기초의 측면에 작용하는 마찰력, 기초의 저면에 작용하는 연직응력 등도 기초의 모멘트 저항거동에 동시에 영향을 미치고 있다. 따라서 향후 보다 자세한 측정이 이루어진 실험을 수행하여 이들의 영향에 대한 추가적인 규명이 이루어진다면, 보다 합리적인 설계를 통해 기존에 비해 경제성이 확보되는 전철주기초의 단면 축소가 가능할 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 논문에서는 실물크기 기초에 대한 모멘트 재하실험을 통해 전도가 발생하는 짧은말뚝에 작용하는 연직토압분포를 측정하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기초에 설치된 토압계를 통해 전도 직전에 작용하는 연직 토압분포를 측정한 결과, 지표 부근에서 일정한 크기의 토압이 상당 깊이까지 발생하였으며, 발생한 토압은 층별다짐의 영향을 받는 것으로 나타났다. 특정깊이 이후에는 회전중심과 가까워질수록 토압이 감소하는 사다리꼴 형태의 분포가 나타났으며, 기초하부에는 회전중심에서 멀어짐에 따라 토압이 선형적으로 증가하여 상부에서 발생한 최대토압의 2배에 이르는 것으로 나타났다.
- 2) 기존 이론에서는 지표부근에서 토압이 거의 발생하지 않는 것과 달리, 기초 주변의 지반을 다짐에 의해 되메우는 방식으로 시공한 경우는 지표 부분에서도 상당한 토

압이 발생하는 것으로 평가되었다.

- 3) 기초의 저항모멘트 설계를 위한 연직토압 분포로, 지표부터 기초 회전중심 깊이의 절반정도까지 일정한 토압이 발생하고, 이후 기초의 회전량에 따라 토압이 선형적으로 변화하는 분포를 제시하였다.
- 4) 전도모멘트를 받는 짧은말뚝의 보다 합리적인 설계를 위해서는 본 논문에서 제시한 연직토압분포 뿐만 아니라, 기초 측면에 작용하는 마찰력, 기초 저면에 작용하는 연직응력 등에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

- Briaud, J.L. and Smith, T.D. (1983) Using the pressuremeter curve to design laterally loaded piles, *Proc. Of 15th Offshore Technology Conf.*, Houston, paper 4501, pp. 495-502.
- Brinch Hansen, J. (1961) *The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces*, Bulletin No. 12, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, pp. 5-9.
- Broms, B.B. (1964) Lateral resistance of piles in cohesive soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, Vol. 90, No. 2, pp. 27-64.
- Kiessling, F., Puschmann, R., and Schmieder, A. (2009) *Contact lines for electric railways : planning, design, implementation*, Publicis publishing, Eriangen, 2009.
- Korea Railroad Research Institute (2010) *Development of Moment Capacity Equation for Railway Electric Pole Foundation*, Korea Rail Network Authority, Daejeon.
- Korea TGV Consortium. (1995) *Basic Environmental Data for Catenary Design*. KTC.
- Meyerhof, G.G., Mathur, S.K., and Valsangkar A.J. (1981) Lateral resistance and deflection of rigid wall and piles in layered soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 18, pp.159-170.
- Petravosits, G., and Qward, A. (1972) Ultimate lateral resistance of a rigid pile in cohesionless soil, *Proc. of 5th European Conf. on SMEF*, Vol.3, pp. 407-412.
- Prasad, Y.V.S.N., and Chari, T.R. (1999) Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils, *Soils and Foundations*., Vol. 39, No. 2, pp. 21-29.
- Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974) Analysis of laterally loaded piles in sand, *Proc. 6th Offshore Technology Conference*, Paper 2080, Houston, Texas, pp. 473-483.
- Smith, T.D. (1987) Pile horizontal modulus values, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 113, No.9, pp. 1040-1044.
- Zhang L., Silva, F., and Grismala, R. (2005) Ultimate Lateral Resistance to Piles in Cohesionless soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 1, pp. 78-83.

© Received September 3, 2013

© Revised September 4, 2013

© Accepted September 23, 2013