

실물인장시험시 변형률계를 이용한 전주에 작용하는 응력분석

(Stress Analysis Acting on Electric Pole using Strain Gauge from Full Scale Pull-Out Test)

안태봉*

(Tae-Bong Ahn)

Abstract

Many electric poles in the softground have been collapsed due to external load. In this study, 10 types of tests were performed with variation of location, numbers and depths of anchor blocks as well as depth of poles to find stresses acting on concrete electric poles. The stresses of concrete poles are relaxed at 600~700[kg] of tensile load, and stresses are concentrated at top of pole, and spread to lower part of pole. In the concrete pole collapse test, tensile load at failure was approximately 1,400[kg], which is twice of design load. As passive zone in the soil increases, the stresses acting on concrete pole are concentrated at lower part of pole based on moment arm earth pressure distribution.

Key Words : Electric Pole, Anchor Block, Pull-Out Test, Stress

1. 서 론

전력수요가 지속적으로 증가함에 따라 전력공급에 필요한 전주를 많이 사용하고 있다. 국내의 해안가 등의 연약지반에 약 6~7만기의 전주가 사용되고 있는 것으로 파악되며 농촌지역의 논 등 기타 연약지반을 포함하면 그 수는 매우 많을 것이다. 전주를 시공할 시에는 일본전기협회의 수평지지력공식을 이용하여 규정대로 시공하고 있지만 기상변화로 인한 강우를 동반한 태풍에 의한 풍하중이 작용시 기초지반의 연약화 및 전주노출부의 축력작용에 의해 많은 전도파

괴가 발생하고 있다[1]. 이는 콘크리트전주기초지반에 대한 지반공학적 응력-변형 거동 특성을 고려하지 않은 채로 시공된 사례가 많기도 하고 실무적으로 지반 특성을 적용하기 위한 제반 규정이 미흡한 실정이기 때문이다. 이를 위하여 연약지반상의 전주에 작용하는 힘들과 전주시공조건, 지반특성에 대한 상세한 이해와 연구를 통하여 합리적인 전주시공을 할 수 있다[2]. 말뚝기초를 설계할 시에는 지반과 말뚝간의 상호작용을 고려한 해석이나 연구가 많지만 콘크리트 전주시초지반에 대하여는 횡방향으로 작용하는 힘들에 대한 지반과 전주의 거동에 관한 연구가 적은 실정이다[3-6]. 강풍에 의한 배전시설물의 안전성은 바람에 의해 야기되는 풍압과 지반 기초의 견고성에 의해 지배받으므로 풍압과 지반기초를 동시에 고려한 안전성 평가가 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 연약지반에 전주를 실물시험시공하고 변형률계를 사용하

* 주저자 : 우송대학교 철도건설환경공학과 교수
Tel : 042-629-6716, Fax : 042-629-6709
E-mail : tbahn@wsu.ac.kr
접수일자 : 2010년 4월 14일
1차심사 : 2010년 4월 20일
심사완료 : 2010년 6월 8일

여 수평하중재하별 부재의 응력을 측정하여 전주근입 깊이, 근가의 위치 및 근가의 수를 변화시키면서 전주의 거동특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연구방법

본 실험은 전주의 근입깊이는 2.5[m]와 4.0[m]의 두 가지로, 근가의 위치 및 수량을 변화시키면서 전주에 인장하중을 점증적으로 재하하여 전주 및 기초지반의 응력의 변화를 측정하였다. 전주 인장시험에 앞서 시험지반의 토질특성을 알기 위하여 현장들밀도시험, 지층구성현황, 표준관입시험(N치), 입도분석을 실시하여 지반의 특성을 분석하였다. 변형률계의 위치는 전주가 상부로 갈수록 단면이 작아지는 변단면이므로 전주의 노출부 길이를 3등분하여 위치를 선정하였는데 인장방향의 전, 후면에 계측기를 부착하였다. 하중재하시 압축과 인장응력을 상호 비교/검토하여 하중재하별 재료의 변형특성 거동을 파악하였다. 실험에서 사용한 콘크리트전주의 길이는 16[m]이고 설계하중은 700[kg], 밑지름은 404[mm], 끝지름은 190[mm]이다. 콘크리트 근가는 240[mm]×1,200[mm]의 제품을 사용하였다.

본 연구에서 수행한 시험 조건별 건주시공 조건은 표 1과 같다. 총 실험의 종류는 토압과 변위분석을 10가지를 실시하였지만 본 논문에서는 전주에 작용하는 응력을 중심으로한 변형률계 측정시험인 TEST-1, 2, 3, 5, 7, 10의 6가지를 중심으로 분석하였다. 그림 1은 인장실험장면을 나타내는 실험전경이다.

표 1. 유형별 실험조건
Table 1. Experimental condition types

실험유형	실험기준		
	근가깊이([m])	근가수량	전주근입([m])
TEST-1	없음	없음	2.5
TEST-2	0.75	1	2.5
TEST-3	1.5	1	2.5
TEST-5	0.5	1	2.5
TEST-7	0.5	4	2.5
TEST-10	0.5	1	4.0



그림 1. 전주 인장실험
Fig. 1. Tensile test of electric pole

3. 지반특성 및 시험 계측기 설치

3.1 지반특성

실험현장은 해안지역으로서 공내지하수위 측정공 2곳의 지하수위는 각각 G.L.-0.7[m], 0.5[m]로 측정되었으며 지층구성 및 표준관입시험결과는 표 2와 같다.

표 2. 표준관입시험 결과
Table 2. The results of SPT(Standard Penetration Test)

공번	지층	구성토질	심도([m])	N치
BH-1	모래층	세립질의 모래/황갈색 /보통조밀	0.0~11.0	20~22
		점토섞인 모래/황갈색 /보통조밀	14.0~17.0	12~18
	점토층	실트섞인 점토/암회색 /연약	1.2~ 8.0	2~4
	실트층	세립 모래섞인 실트/담회색/매우견고	11.0~14.0	15~18
	풍화토	실트섞인 모래/갈색/매우 조밀	17.0~20.0	50/17~50/12
BH-2	모래층	실트섞인 모래/갈색 일부구간 백층(Core형성) 하부로 갈수록 매우조밀	20.0~27.0	50/7~50/2
		세립질의 모래/황갈색/매우 느슨	0.0~3.2	2

공변	지층	구성토질	심도(m)	N치
	점토층	실트섞인 점토/암회색 연약~보통건교	3.2~20.0	2~8
	풍화토	실트섞인 모래/황갈색 조밀~매우조밀	20.0~26.0	42~50/17
	풍화암	실트섞인 모래/매우조밀 하부로 갈수록 매우조밀(실트질 모래화)	26.0~32.0	50/6~50/2

실험대상지반의 물리적, 역학적 특성을 파악 및 통일분류법에 의한 토층분류를 실시하였으며 이에 따른 결과는 표 3과 같다.

표 3. 흙의 실내실험결과
Table 3. Laboratory experimental results of soils

Wn (%)	GS	Atterberg Limits		D 다짐		점착력, [kg/cm ²]	내부마찰각(°)	USCS
		LL (%)	PI (%)	Wopt (%)	yd,max			
10.6	2.62	NP	NP	13.2	1.772	0.27	26.3	SP

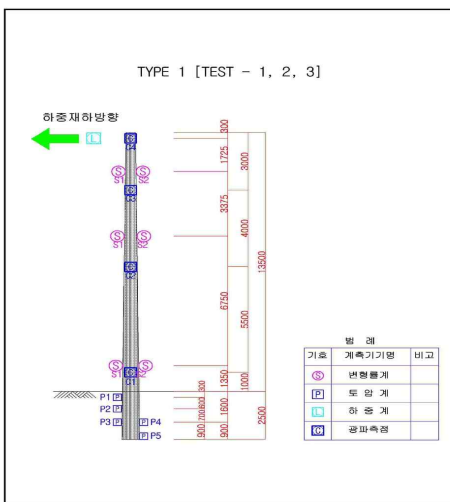


그림 2. 변형률계 설치 위치도
Fig. 2. Schematic diagram of Strain gauge Instrumentations

3.2 변형률계 설치

변형률계의 위치는 전주가 상부로 갈수록 단면이 작아지는 변단면이므로 전주의 노출부 길이를 3등분하여 위치를 선정하여 인장방향의 전, 후면에 계측기를 부착하였다. 변형률계는 총 36개를 설치하였으며 전주부재에 6지점을 선정하여 하중재하별 부재의 응력을 측정하여 전주의 거동특성을 평가하였다(그림 2). 이 때 하중은 근가의 설치방향과 수직하고 반대방향에서 인장하중을 가하는 것을 기준으로 실험하였다. 전주에 설치한 변형률계를 통하여 전주에 작용하는 응력을 측정하였다. 전주를 3등분하여 상단부분, 중간부분, 하단부분에 좌우 설치하였는데 이를 각기, S1, S2, S3, S4, S5, S6의 기호를 사용하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 하중재하단계에 따른 분석

4.1.1 TEST-1의 전주에 작용하는 응력

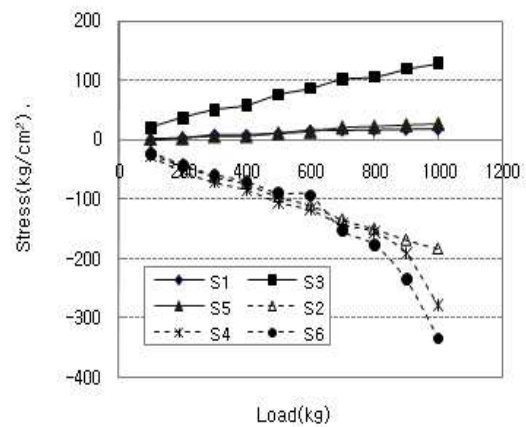


그림 3. 하중재하 단계에 따른 전주에 작용하는 응력 변화 (TEST-1)

Fig. 3. Stress acting on electric pole with loading (TEST-1)

S-1, S-3, S-5는 전주에 작용하는 압축응력을 나타내고 S-2, S-4, S-6은 전주에 작용하는 인장응력을 나타낸다. 하중단계에 따라 재하응력은 증가하고 있

고 같은 높이에서 인장응력이 압축응력의 약 2.7배인 것으로 나타났다. 그림 3과 같이 하중재하방향 배면 저부에서 응력 증가폭이 크게 나타났다. 이는 초기하중재하시 부재 상부에서 하중이 전달되므로 상부에서 하중을 분담하다 점차적으로 부재 전체에 응력이 전이되는 양상을 나타냈다.

4.1.2 TEST-2의 전주에 작용하는 응력

TEST-2는 근가를 0.75[m]에 설치한 것으로 TEST-1과 거의 비슷한 양상을 나타내고 있다. S1과 S5의 차이가 TEST-1보다는 좀 더 크게 나타났다. 전주의 중앙부인 S3의 압축응력이 가장 크고 하단부에 인장응력이 가장 크게 작용함을 알 수 있다(그림 4).

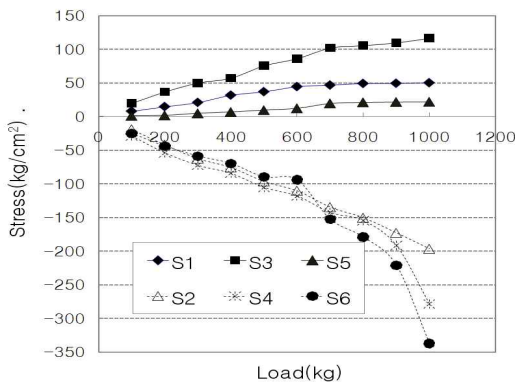


그림 4. 하중재하 단계에 따른 전주에 작용하는 응력 변화 (TEST-2)
Fig. 4. Stress acting on electric pole with loading (TEST-2)

4.1.3 TEST-3의 전주에 작용하는 응력

TEST-3은 근가를 1.5[m] 깊이에 설치한 것으로 전주에 작용하는 인장 응력이 앞의 TEST-1과 TEST-2의 약 3배 정도가 됨을 알 수 있다(그림 5). 이는 수평 변위량과 관계가 있는 것으로 TEST-1보다 변위가 작은 TEST-3에 응력이 크게 작용함을 알 수 있어 변위에 저항하기까지는 전주가 응력을 감당함을 알 수 있다[2-3]. 전주에 작용하는 인장응력에 전주가 파손되지 않도록 안정하도록 콘크리트 전주를 제작하여야 한다.

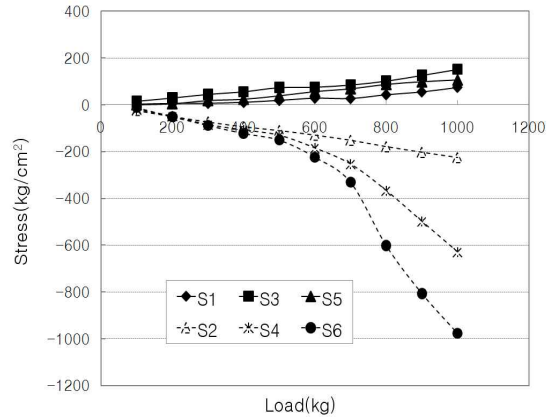


그림 5. 하중재하 단계에 따른 전주에 작용하는 응력 변화 (TEST-3)
Fig. 5. Stress acting on electric pole with loading (TEST-3)

4.1.4 TEST-5의 전주에 작용하는 응력

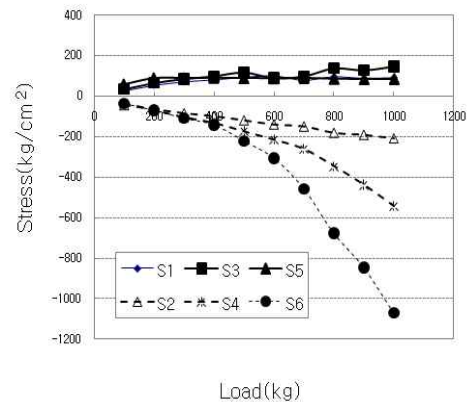


그림 6. 하중재하 단계에 따른 전주에 작용하는 응력 변화 (TEST-5)
Fig. 6. Stress acting on electric pole with loading (TEST-5)

TEST-5는 근가를 0.5[m]의 깊이에 설치한 것으로 전주에 작용하는 응력이 TEST-1, TEST-2보다 크게 나타났으나 TEST-3과는 크게 차이가 나지 않아서 근가의 근입깊이를 변화시키는 것은 전주에 작용하는 응력에는 큰 차이가 없다. 전주에 작용하는 응력은 지반이 받는 토압, 지반의 변위, 그리고 지반의 변형시 아칭 효과와 서로 깊게 연관관계가 있다. 변위에 저항하며 지반의 토압이 커지면 전주에 작용하는 응력도 커지게

되고 이것은 다른 실험시공시 또는 온도의 영향으로 지반의 동결 등 지반조건도 한 요소이다(그림 6).

4.1.5 TEST-7의 전주에 작용하는 응력

본 실험은 다른 조건에 비해서 상대적으로 압축응력이 작게 발생하였는데 근가수량이 4개로 증가함으로써 변위량은 작고 토압으로 견디면서 상대적으로 전주에 압축방향으로 작용하는 응력이 작아진 것으로 판단된다(그림 7).

시공조건은 전주기초근입이 G.L.-2.5[m]이고 근가 위치는 G.L.-0.5[m]~1.3[m]에 근가수량 4개를 설치하였다. 근가를 설치하기 위해 다소 광범위한 굴착 및 되메우기 작업으로 흙의 전단강도가 저하되어 지반의 저항력이 감소에 따른 것으로 추정된다. 그러나 교란된 지반이 전단강도를 회복하였을 경우 전주에 응력이 보다 증가될 것으로 판단된다. 실제로 근가를 4개를 시공하는 경우는 없다. 4개를 시공하는 것은 지반 안정에 효과는 있지만 경제성과 시공성을 고려할 때 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

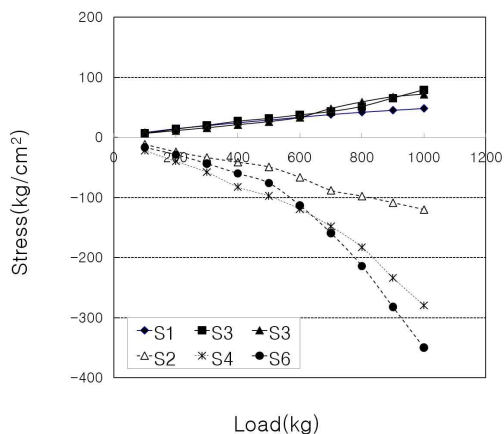


그림 7. 하중재하 단계에 따른 전주에 작용하는 응력 변화 (TEST-7)
Fig. 7. Stress acting on electric pole with loading (TEST-7)

4.1.6 TEST-10의 전주에 작용하는 응력

TEST-10은 전주에 작용하는 응력이 전체적으로 작음을 알 수 있으며 압축응력은 다른 유형보다 1/4~1/2 정도의 값을 나타낸다(그림 8). 이 시험은 전주의

깊이가 깊어짐으로써 전주에 작용하는 수동토압이 커져서 인장하중을 작용할 시 그 힘을 수동토압에 많은 부분을 저항할 수 있으므로 전주에 작용하는 인장응력은 상당히 줄어드는 특성을 보여준다. 전주를 4[m] 깊이로 시공하는 사례는 없으나 전주의 도괴과괴가 우려되는 지역에서는 전주의 근입깊이를 조절할 필요가 있다.

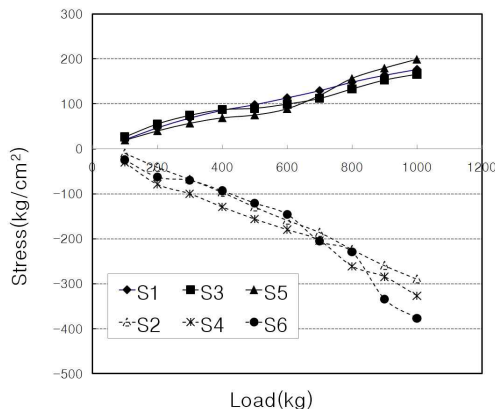


그림 8. 하중재하 단계에 따른 전주에 작용하는 응력 변화(TEST-10)
Fig. 8. Stress acting on electric pole with loading (TEST-10)

4.2 전주의 위치별 작용응력

4.2.1 전주에 작용하는 압축응력

하중재하방향에 설치한 전주의 각 위치에 따른 압축응력으로 그림 9와 같이 전주 최상부에서 응력이 집중되다 점차적으로 전주 하부로 응력이 전이되는 양상을 보였으며 전주 하부 응력의 크기순서는 TEST-10, 5, 2, 7, 3, 1번의 순이다. 이것은 수평변위량의 크기순서와 전주에 작용하는 응력은 수평변위량과 반비례함을 알 수 있다[2-3].

4.2.2 전주에 작용하는 인장응력

그림 10과 같이 하중재하방향 배면에 설치한 전주 높이별 인장응력 값으로 TEST-5번의 경우 전주 최상부에서 최대 인장응력이 발생되었고 이후 점증하중 재하하중별 전주 저부로 응력이 전이되는 양상을 보

였다. 이는 재료의 특성상 상부로 단면이 작아지는 변 단면과 재하하중 전달이 상부로부터 발생되었기 때문 으로 판단된다.

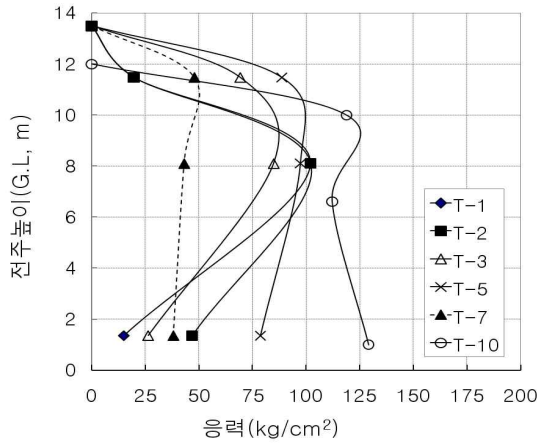


그림 9. 재하하중크기에 따른 전주의 위치별 작용압축응력, 재하중 700[kg]

Fig. 9. Compression stresses acting on various locations of electric pole(700[kg] loading)

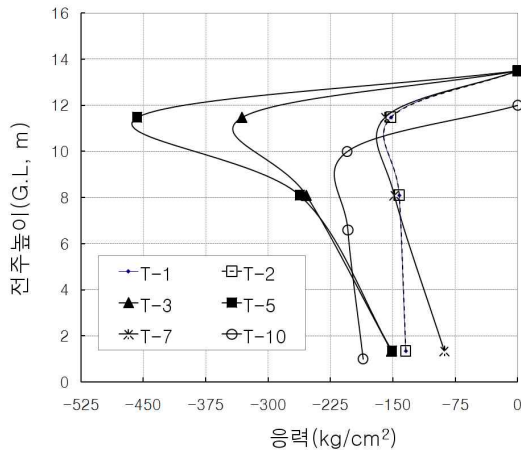


그림 10. 재하하중크기에 따른 전주의 위치별 작용인장응력, 재하중 700[kg]

Fig. 10. Tensile stresses acting on various locations of electric pole(700[kg] loading)

4.3 전주도괴실험

전주도괴실험을 TEST-5, 10번에 실시하였으며 그 결과 TEST-5번의 경우 1,392[kg]에서 파괴되었으며 그림 11과 같이 결손위치는 상부로부터 7[m]이다.

TEST-10번의 경우 파괴하중은 1,398[kg]이며 파괴 위치는 지표부로 나타나 파괴하중의 크기는 거의 동일하고 파괴 위치가 상이하게 발생했다. 이는 전주기 초 지반내 수동영역의 차이와 전주재료의 특성으로 구분할 수 있다. 지반내 하부 수동영역이 커짐에 따라 전주 상부로부터 모멘트 작용중심과의 거리의 차이로 볼 수 있으며 상부 수동저항력이 크게 발생하면 전주에 작용하는 응력이 전주 저부에 집중하는 특성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 TEST-5의 경우 지반내 수동저항력이 감소됨에 따라 모멘트 작용중심점까지의 거리가 길어져 전주의 중심에 응력이 집중된 것으로 판단된다. 또한 TEST-10의 경우 파괴위치가 지표부인 점과 상부 수동저항력이 증가된 것으로 볼 때 전주기초의 안정성에 유리한 것으로 판단된다.



그림 11. 전주 도괴시험, TEST-5

Fig. 11. Tensile collapse test of electric pole, TEST-5

5. 결 론

연약지반에 실물크기의 전주를 시험시공하여 전주에 작용하는 응력을 변형률계를 이용하여 실물계측을 실시하였다. 전주는 10개의 유형으로 시험시공하였는데 근가의 위치 및 수량을 변경하였고 전주의 근입깊이를 변경하며 각 경우에 응력을 측정하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 초기하중 재하시 상부에서 굴절된 양상을 보이다 점중하중에 따라 전주의 중앙부로 굴절의 양상이 전이되었다. 이는 재료 자체가 상부로 작아지는

변단면의 특성과 하중전달 위치가 최상부로서 초기하중시 재료의 상부에서 하중을 분담하다 재하 하중 응력이 점차적으로 재료 전체에 전이되는 양상으로 판단된다.

- 2) 전주에 작용하는 응력을 변형률계를 통하여 측정 한 결과 인장력이 600~700[kg] 사이에서부터 전주의 응력이완현상이 발생하였고 근가를 4개 설치한 경우가 응력감소 현상이 뚜렷하게 나타났다. 이는 근가를 설치하기 위해 다소 광범위한 굴착 및 되메우기 작업으로 흙의 전단강도가 저하되어 지반의 저항력이 감소에 따른 것으로 추정된다. 그러나 교란된 지반이 전단강도를 회복하였을 경우 전주에 응력이 다소 증가될 것으로 판단된다. 근가를 4개 시공하는 것은 전주에 작용하는 응력을 감소시키는데는 효과가 있지만 경제성과 시공성을 고려하여야 한다.
- 3) 하중재하방향에 설치한 전주 높이별 응력 추이는 초기하중시 전주 최상부에서 응력이 집중되다 추가하중 재하시 점차적으로 전주 저부로 응력이 전이되는 양상을 보였으며 응력의 크기순서는 TEST-10, 5, 2, 7, 3, 1번의 순이다.
- 4) 전주의 근입 깊이가 큰 TEST-10의 경우 수평변위량은 작고 압축응력과 인장응력 값이 상대적으로 크게 측정되어 전주기초 안정성과 전주 재료에 대한 상관관계에 있어 서로 반비례한다. 전주 재원은 설계하중이 700[kg]이나 절손은 약 1,400[kg]으로 약 200[%]에 해당되므로 연약지반에 건주를 시공시 상대적으로 약축인 기초부에 중점을 두어야 할 것이다.
- 5) 전주 절손실험을 TEST-5, 10번에 실시하였으며 그 결과 TEST-5번의 경우 1,392[kg]에서 파괴되었으며 위치는 상부로부터 7[m]이다. TEST-10번의 경우 파괴하중은 1,398[kg]으로 파괴 위치는 지표부로 나타나 파괴하중의 크기는 거의 동일하고 파괴 지점이 상이하게 발생했다. 이는 전주기초 지반내 수동영역의 차이와 전주재료의 특성으로 구분할 수 있다. 지반내 하부 수동영역이 커짐에 따라 전주 상부로부터 모멘트 작용중심과의 거리의 차이와 토압분포로 볼 때 상부 수동저

항력이 크게 발생하면 전주에 작용하는 응력이 전주 저부에 집중하는 특성이 있는 것으로 판단된다.

- 6) 전주자체가 파괴되는 것 외에 기초지반의 변형과 응력파괴 시공기준의 고려 요인이기 때문에 실무에서 적용할 시공조건을 고려할 시에는 기초지반에 작용하는 변형 응력 특성, 전주의 파괴 등을 종합적으로 고려하여야 한다

References

- (1) 손명윤 임종석, 점성토에 설치된 콘크리트 전주지반의 수평방향지지력, 대한토목학회 학술발표회, 2004.
- (2) 안태봉, 배전용 콘크리트전주 기초지반의 횡방향변위 분석, 한국조명전기설비학회 논문집, Vol. 23, No.5 pp. 42~49, 2009.
- (3) 안태봉, 연약지반에 시공된 전주의 실물인장실험을 통한 수평변위분석, 한국조명전기설비학회 논문집, Vol. 23, No.12 pp. 115~126, 2009.
- (4) White, D. J., Thompson, M. J., Suleiman, M.T and Schaefer, V. R. "Behavior of Slender Piles Subject to Free-Field Lateral Soil Movement", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 4, pp. 428-436, April 2008.
- (5) Rajashree, S. S., Sitharam, T. G., "Nonlinear Finite-Element Modeling of Batter Piles under Lateral Load", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 7, pp. 604-612, 2001.
- (6) Chen, S. L. and Chen, L. Z. "Note on the Interaction Factor for Two Laterally Loaded Piles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 11, pp. 1685-1690, 2008.

◇ 저자소개 ◇



안태봉 (安泰鋒)

1963년 2월 4일생. 1985년 한양대학교 토목공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(석사). 1991년 5월 미국 텍사스 오스틴 대학교 졸업(석사). 1995년 12월 미국 아리조나대학교 졸업(박사). 1996년 한국 건설기술연구원 재직. 1998년 5월 토질 및 기초기술사 취득. 1999년 9월~현재 우송대학교 교수 근무.