

양방향말뚝재하시험의 수치해석 Numerical Analyses of O-Cell Load Test on Pile

주용선¹⁾, Yong-Sun Joo, 김낙경²⁾, Nak-Kyoung Kim, 김웅진³⁾, Woong-Jin Kim, 박종식⁴⁾, Jong-Sik Park

¹⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ.

³⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ.

⁴⁾ 한화건설 한화기술연구소 선임연구원, Research Engineer, Hanwha Research Institute of Technology

SYNOPSIS : Bi-directional load test is one of O-cell tests. The O-cell test is a system which may be used for performing static load tests on cast in situ reinforced concrete bored piles. The technique was devised and developed by Osterberg of Northwestern University(USA) and has been in use around the world. The principle of the method is that an O-cell is installed in a cast in situ bored pile base. Once the pile concrete reaches its design strength the cell is connected to an hydraulic pump and pressured. Pressurisation causes the cell to expand, developing an upward force on the section of pile above the cell loads, pile movements and strains within the pile then enable the capacity of the pile and its load settlement curves to be ascertained.

Bi-directional load tests using O-cell are now becoming common practice around the world, particularly where the loads to be applied are high or where it is not convenient to perform top-down loading tests. In the study, calculate ultimate capacity of bi-directional load test using FEM and beam on elasto-plastic foundation theory.

Key words : O-cell test, pile load test, FEM, bi-directional load test, numerical analysis

1. 서 론

최근 도심지 건설공사에서는 높은 지지력이 요구되는 건설시공이 빈번히 이뤄지고 있으며 이에 따라 말뚝의 규모도 증가하고 있으며, 그에 적합한 말뚝시험법의 개발과 그에 대한 연구가 요구되고 있다.

1980년대 미국 노스웨스턴 대학의 Osterberg에 의하여 개발된 오스터버그 셀 시험법(이후 O-cell 시험법)은 말뚝의 선단부에 O-cell 장비를 설치하여 상향과 하향으로의 하중을 동시에 작용시켜 이때의 변위를 상부와 하부에서 각각 측정함으로써 말뚝재하시험을 실시하는 시험법이다. O-cell 시험법의 개발 이후 미국, 유럽, 일본, 싱가포르 등등 세계 각지에서 O-cell을 이용한 말뚝재하시험이 수행되었으며 그에 대한 연구들도 계속되어 왔다. 국내에서도 2003년부터 O-cell을 이용한 시험이 도입되었으며 현재까지도 시험이 계속되고 있다. O-cell 시험의 거동에 대한 연구동향을 살펴보면, Eric C. Drumm(2004)은 필라델피아의 Mica shcist의 Drill sharft pile에서의 O-cell 시험에 대하여 유한요소법을 이용한 수치해석을 통하여 현장 계측결과와 비교하여 그간 O-cell 시험에서의 말뚝의 탄성압축변형에 대한 오류를 지적하였다. Recinto(2003)은 연암에 근입된 말뚝의 유한요소해석과 시험을 통해서 O-cell시험의 결과는 말뚝길이와 말뚝직경비가 20인 경우에 그 결과가 일반 정재하말뚝시험결과와 유사하다고 하였다. 그

외에도 국내에서는 임종석 등(2007)은 양방향말뚝재하시험 결과를 바탕으로 현장타설말뚝의 하중전이곡선은 분석하였으며 국내 지반에 맞는 하중전이함수식을 제안하였다.

양방향말뚝재하시험은 O-cell 시험의 일종으로써 기존의 O-cell 시험 기본 이론을 바탕으로 국내 도입을 위해 다양하게 개선된 시험법이다. 국내에서는 OO대교 현장이나 OO지역 건설현장에서 고도의 하중을 재하하거나 장대말뚝에서 수행된 사례가 있다.

2. 양방향말뚝재하시험 개요

양방향말뚝재하시험은 O-cell 시험의 일종으로 주로 현장콘크리트말뚝에 적용되며 그림1과 같이 현장콘크리트 말뚝의 선단 혹은 사전에 계획된 깊이에 설치하여 말뚝 시공이 완료된 후 시험을 실시한다.

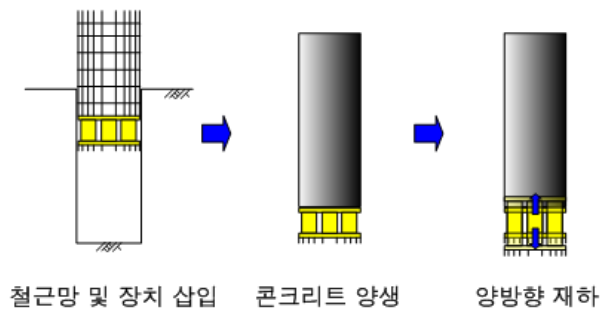


그림 1. 양방향말뚝재하시험 시공 및 시험 단계

시험은 O-cell을 이용하여 재하를 실시하므로 일반 말뚝두부에 재하하는 말뚝시험에 비해서 공간적인 효율성을 가진다. 일반 말뚝두부에 재하하는 말뚝시험은 큰 규모와 중량의 재하 시스템이 요구되는 반면에 양방향말뚝재하시험은 말뚝 선단지지력과 마찰지지력을 각각 상대의 반력으로 하여 재하가 이루어지므로 반력 시스템이 불필요하다. 뿐만 아니라 지하에서 재하가 이루어지므로 큰 하중의 재하 시험이 가지고 있는 위험성 배제되므로 안정성 또한 뛰어나다. 양방향말뚝재하시험은 한번의 재하로 선단측과 마찰측으로의 하중이 동시에 재하되므로 선단지지력과 마찰지지력을 한번의 시험으로 측정할 수 있는 장점이 있다. 하중이 재하됨에 따라 선단측과 마찰측으로의 발생된 변위를 측정하고 이를 상향, 하향으로 나누어 하중-변위 관계를 산정한다(그림 2).

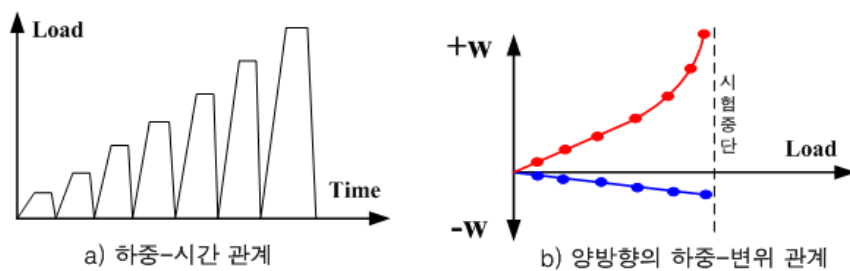


그림 2. 양방향말뚝재하시험의 하중 재하 단계 및 하중-변위 관계

본 시험은 단계적으로 하중을 증가시키는 중에 선단이나 마찰측 중 한 측이라도 극한파괴가 발생하게 되면 시험을 중단하여야 하는 어려움이 있다. 그러므로 O-cell을 이용한 양방향말뚝재하시험은 사전에 철저한 지반조사를 통하여 선단지지력과 마찰지지력을 예상하고 각 측의 지지력이 균형을 이루어 서로의 반력으로써의 역할을 충분히 발휘할 수 있도록 시험말뚝의 길이와 O-cell의 근입깊이를 산정하여 설치하여야 한다. 이와같이 양방향말뚝재하시험은 적은 시험공간의 면적으로나 안전성면에서의 장점이 있는 반면에 양 측 지지력의 균형있는 지지력 측정의 어려움이 있다.

3. 양방향말뚝재하시험의 극한지지력 산정

말뚝재하시험을 통한 말뚝의 지지력의 산정은 말뚝의 설계 및 안정성 판정을 위하여 중요하다. 일반적으로 말뚝두부재하 방식의 시험은 실제 건설시공 시 설계하중에 관련하여 하중을 재하하며 두부재하시의 말뚝 거동은 실제 말뚝 거동과 유사하므로 시험 결과도 신뢰성 있는 시험으로 수행되어 왔다. 이에 반해 양방향말뚝재하시험은 하중의 재하 위치가 실제 설계시의 말뚝거동과 다르고 하중재하 시 발생하는 마찰력의 분포도 실제와 상이하다. McClelland(1972)에 의하면 두부재하시의 마찰저항보다 인발저항력은 약 70% 정도 작은 값을 갖는다고 하였다. 그러나 그 외에 하중의 작용방향에 관계없이 주면마찰력은 근본적으로 차이가 없다는 주장도 있다(De Beer, E.E. 1979).

본 연구에서는 양방향말뚝재하시험의 극한지지력 산정을 위하여 수치해석을 이용하여 극한선단지지력과 극한주면마찰지지력을 각각 산정하여 등가하중-변위 관계를 결정하고 그 결과를 바탕으로 양방향말뚝재하시험의 극한지지력을 산정하였다.

3.1 탄소성보 해석법에 의한 수치해석

탄소성보 해석법은 그림 3과 같이 말뚝을 탄소성지반 위의 보로 가정하여 해석하는 방법으로써, Hetenyi(1946)에 의하여 이론해가 제안된 해석법이다. 말뚝-지반의 상호작용 거동을 고려하기 위해 말뚝주면의 흠을 분리된 비선형스프링으로 모델링하여 유한차분법으로 해석하는 방법으로써 Texas A&M에서 개발한 BMCOL76 프로그램을 이용하였다.

그림 3와 같이 말뚝주면의 흠은 말뚝의 축방향의 스프링과 말뚝선단에서의 스프링으로 가정하고, 이때 스프링의 특성은 말뚝주면에서는 단위마찰지지력-변위 곡선과 선단에서의 단위선단지지력-변위의 형태로 P-y curve를 정의한다. 선형탄성 말뚝과 비선형지반의 지배방정식은 식 1과 같다.

$$\frac{d^2W}{dz^2} = \frac{A_p}{E_p A} q_s(W) \quad (1)$$

여기서, E 는 말뚝 탄성계수, W 는 수직변위, A_p 는 말뚝 직경 둘레, q_s 는 단위마찰력, A 는 단면적이다. 양방향말뚝재하시험의 탄소성보해석을 위하여 O-cell이 설치된 위치를 기준으로 상부말뚝과 하부말뚝으로 나뉘고 하중이 재하됨에 따라 하중재하위치를 기준으로 양방향으로 소성 영역이 증가한다는 이론을 바탕으로 그림 4와 같이 모델링하였으며 해석에 적용된 P-y curve는 그림 5와 같이 정의한다(Xiong, J. Jiang, Y. Yang, M., 2007).

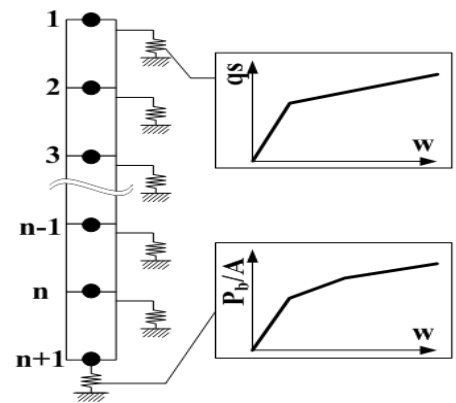


그림 3. 축하중 말뚝-지반의 모델링

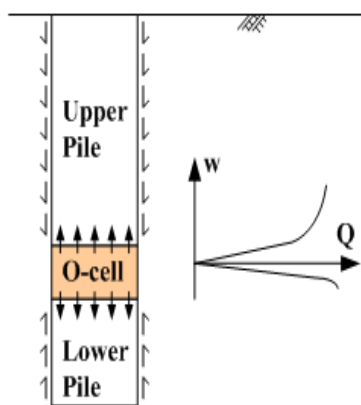


그림 4. 양방향말뚝재하시험의 모델링 개념도

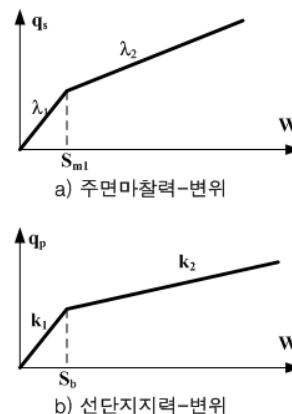


그림 5. 해석에 적용된 P-y curve

P-y curve 적용된 λ_i , S_{mi} , S_b , k_i 는 실제 양방향말뚝재하시험 결과(Xiong, J. Jiang, Y. Yang, M., 2007)를 참조하여 산정하였으며 그 값은 표 1과 같다.

표 1. P-y curve에 적용된 수치

$L_{upper}(m)$	$L_{down}(m)$	D(m)	$\lambda_1(kPa/m)$	$\lambda_2(kPa/m)$	$S_{m1}(mm)$	$k_1(kPa/m)$	$k_2(kPa/m)$	$S_b(mm)$
25	0	0.4	7,955	1,716	2.03	5.034×10^5	2.012×10^4	2.14

3.2 유한요소법을 이용한 수치해석

양방향말뚝재하시험의 극한지지력 산정을 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석을 실시하였다. 해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Standard 6.8-1을 이용하여 Axisymmetric조건으로 해석하였다.

표 2. 해석에 적용된 물성치

	Density (t/m ³)	Modulus of Elastic(kN/m ²)	Poisson's Ratio	Friction Angle	Dilation Angle	Cohesion Yield Stress (kPa)
Weathered Soil	1.8	3.5×10^4	0.3	30	12	38
Pile	2.3	2.5×10^7	0.2			

경계영역은 수평방향으로는 말뚝직경의 10배 이상, 수직방향으로는 말뚝길이의 2배 이상의 충분한 경계영역을 설정하였으며(그림 6), 지반과 말뚝은 Solid요소를 사용하였다. 지반은 일반적인 균질한 풍화토에 근입 되어있는 상태로 가정하여 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였으며, 말뚝은 현장타설콘크리트 말뚝으로 가정하여 지반에 비해 같은 응력 조건하에서 변형이 작으므로 선형탄성거동으로 가정하였다(표 2). 이질재료간 경계면요소는 법선방향과 접선방향의 관계를 적용하였다(그림 7).

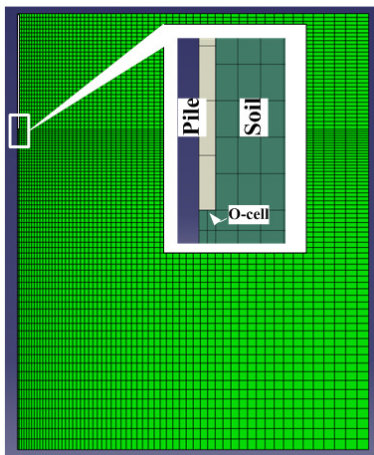


그림 6. 해석에 적용된 요소망

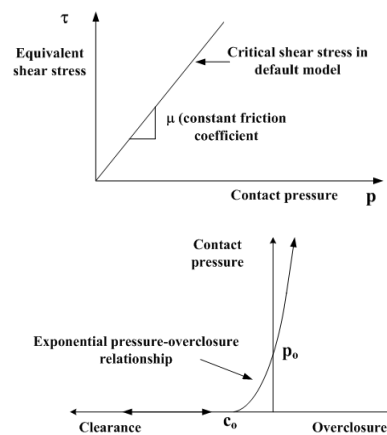


그림 7. 경계면요소의 법선방향과 접선방향 관계

해석은 총 2 STEP으로 수행하였으며, 현장콘크리트 말뚝의 시공특성상의 시공단계는 모사하지 않았다. 최초 STEP#1에서 초기 지중응력상태를 구현한 하였으며 초기응력 상태에서 최대변위가 $1.0 \times 10^{-6}m$ 이하가 되도록 초기응력 조건을 적용하였고, 그 STEP#2에서 선단과 마찰측으로 하중을 재하하는 단계를 경계조건으로 변위를 적용하였다. 경계조건의 적용 비율은 $8.333 \times 10^{-5}m/s$ 의 비율로 적용하였다.

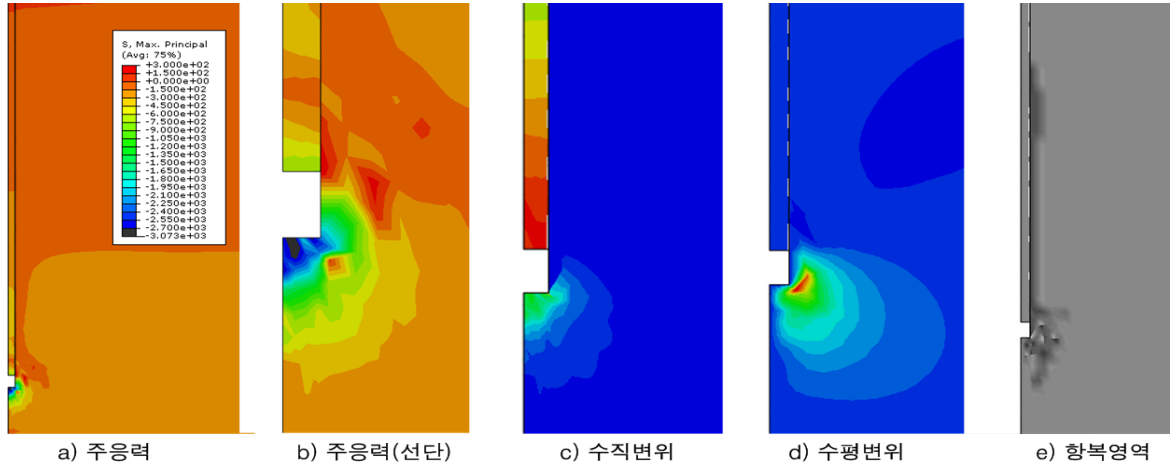


그림 8. 양방향말뚝재하시험의 유한요소해석 결과

해석 결과 O-cell에 의한 선단과 주면마찰측으로의 하중재하로 인하여 말뚝의 선단에서의 응력집중이 발생하였으며(그림 8 (a), (b)), 수직 및 수평변위의 분포는 말뚝주면의 마찰측보다 선단에서 상대적으로 크게 발생하였다(그림 8 (c), (d)). 항복영역은 그림 8 (e)와 같이 말뚝의 선단과 주면마찰측 모두에서 발생하였으며 말뚝선단에서의 항복영역이 확대되는 경향을 보이고 있다.

3.3 해석결과 및 분석

탄소성보 해석법과 유한요소법을 이용한 수치해석결과 그림 9~10과 같은 결과를 도출하였다. 유한요소법을 이용하여 양방향말뚝재하시험의 해석한 결과 그림 9와 같이 선단에서의 극한지지력은 약 600kN, 극한주면마찰지지력은 약 650 kN의 결과가 나타났다. 양방향말뚝재하시험의 등가하중-변위 관계를 산정한 결과(그림 10의 FEM), 말뚝극한지지력은 약 1040 kN 이었고, 탄소성보 해석법을 이용하여 해석한 결과(그림 10의 BC), 말뚝극한지지력은 약 1100 kN으로 유한요소해석 결과와 유사하였다. 본 연구에 적용된 말뚝을 대상으로 β -method(Combarieu, 1985)로 산정한 말뚝의 극한지지력은 1325.4 kN으로 수치 해석을 이용한 극한지지력이 설계값보다 작게 나타났다.

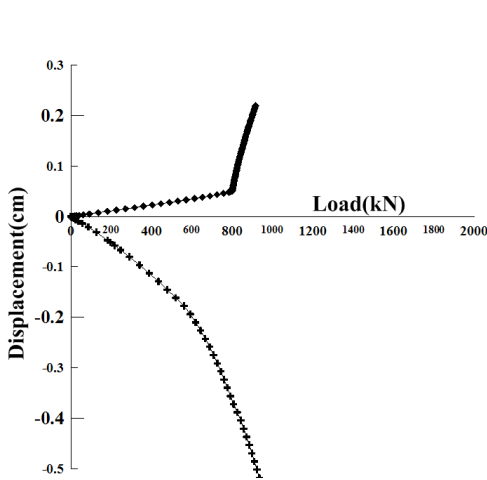


그림 9. 양방향말뚝재하시험의 FEM 결과

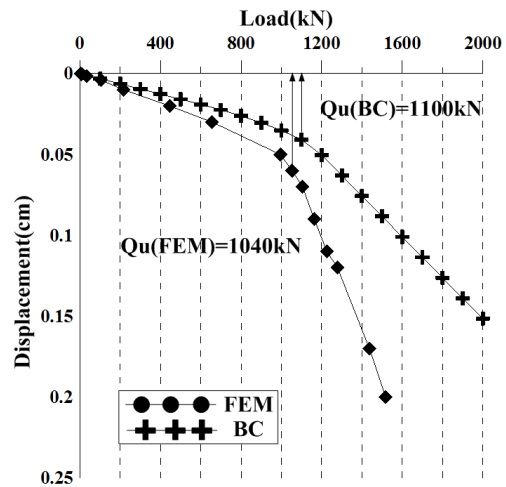


그림 10. FEM과 BMCOL76 극한지지력 산정 결과

4. 결 론

본 연구에서는 양방향말뚝재하시험을 수치해석적인 방법으로 극한지지력을 산정하여 각 방법에 대한 결과를 비교하였다.

- 1) 양방향말뚝재하시험의 FEM해석결과 응력 및 변위의 분포가 선단재하말뚝의 경향과 유사하게 나타났다.
- 2) 양방향말뚝재하시험의 극한지지력 산정을 위하여 FEM해석 결과와 탄소성보 이론을 바탕으로 한 BMCOL76 프로그램을 이용한 수치해석 결과가 유사하게 나타났다.
- 3) 양방향말뚝재하시험의 수치해석을 이용한 극한지지력은 설계값의 약 80%를 보였다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 기초과학연구과제(KRFB00797)의 지원으로 수행되어 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 임종석, 하 혁 (2007), “양방향 현장시험결과를 이용한 현장타설말뚝의 하중전이곡선 분석”, 대한토목학회논문집, 제27권, 13호, 67-77.
2. Bill Attwooll, M.,(2004)“I-25 Trex Project: O-cell Tests and Drilled Shaft Design Recommendations”, Geotechnical Engineering for Transportation Projects, GeoTrans 2004, 1192~1199.
3. Castelli, R. J., Wilkins, Ed.,(2004) “Osterberg Load Cell Test Results on Base Grouted Bored Piles in Bangladesh”, ASCE.
4. De Beer, E. E., Lousberg, E., De Jonghe, A., Carpentier, R. and Wallays. M. (1979) "Analysis of the Results of Loading Tests Performed on Displacement Piles of Different Types and Sizes Penetrating at a Relatively Small Depth into a Very Dense Sand Layer", Proceedings, Recent Developments in the Design and Construction of Piles , ICE. London, 199~ 211.
5. Eric C. Drumm, Gang Zuo, M. Zia Islam, Michael Zhiqiang Yang (2003) "Numerical Analysis of Drilled Shaft O-Cell Testing in Mica Schist", ASCE, GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems 2004, 778~789.
6. McClelland, B. (1972) "Design and Performance of Deep Foundations", Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Purdue Univ.
7. O. S. Kwon, Y. K. Choi, O.K. Kwon, M.M. Kim,(2005)“Comparison of the Bidirectional Load Test with the Top-Down Load Test”, Transportation Research Board of the National Acad, Volume 1936, 108 ~ 116.
8. Page, R. Lim, S. P. Chow, W. L. Ang, M. K.,(1999) “Practical Aspects of Osterberg Cell Testing of Bored Piles in Singapore”, TUNNELLING -INTERNATIONAL SYMPOSIUM-, Institution of Mining and Metallurgy, 33 ~ 44.
9. Recinto, B.,(2003)“Numerical Analysis of the Osterberg Cell Loading Test”, Conference on Deep Foundations;Deep Foundations in Compressible Soil and Soft Rock, Deep Foundations Institute, 361 ~ 374.
10. Russo, G., Recinto, B., Viggiani, C., de Sanctis, L.,(2003) “A Contribution to the Analysis of Osterberg's Cell Load Test”, Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe(ed.), Rotterdam, 331 ~ 338.
11. Schmertmann, J. H., Hayes, J. A., (1997)“The Osterberg Cell and Bored Pile Testing”, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL ENGINEERING CONFERENCE, Vol. 3, 137 ~ 168.
12. Thompson, D. E. Erikson, C. M. Smith, J. D.,(1989) "Load Testing of Deep Foundations Using the Osterberg Load Cell", ANNUAL MEMBERS CONFERENCE- DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE -PREPRINT-, DFI, 31 ~ 48.
13. Xiong, J. Jiang, Y. Yang, M.,(2007) "Analytical Solution Transformation Method for Data of O-cell Pile Testing", 同濟大學學報 (Journal of Tongji University : natural science), Vol.35 No.2, 161 ~ 165.