Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 14, No. 5 pp. 2505-2510, 2013

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.5.2505

점토지반에 설치된 불균질말뚝의 상부길이 결정을 위한 매개변수 연구

이승현[1*]
[1]선문대학교 토목공학과

Parametric Study on Determining Upper Length of Nonhomogeneous Pile installed in Clay

Seung-Hyun Lee[1*]
[1]**Department of Civil Engineering, Sunmoon University**

요 약 점토지반에서 횡방향하중을 받는 불균질말뚝과 균질말뚝의 거동에 영향을 미치는 인자를 파악하고 개발된 해석기법을 적용하여 매개변수 연구를 수행하였다. 매개변수연구에서 고려한 2개의 균질말뚝에 있어 말뚝 근입깊이에 따른 매개변수는 휨강성이 클수록 크게 계산되었다. 불균질말뚝에 대한 매개변수는 재료경계점에서 멀어짐에 따라 동일한 휨강성을 갖는 균질말뚝의 매개변수에 수렴하였다. 균질말뚝과 유사한 하중지지능력을 발휘할 수 있도록 하는 적절한 불균질말뚝의 상부길이를 결정하기 위해서는 균질말뚝과 불균질말뚝의 매개변수 변화양상과 해석을 통해 얻는 횡방향변위 및 부재력 등을 종합적으로 비교해야 한다.

Abstract Parametric studies on nonhomogeneous pile and homogeneous pile installed in clay were performed through the developed technique to investigate the effects of considered factors on the lateral pile behaviors. Values of the parameters with embedment depths of the two piles having different flexural rigidity show that values of the parameters for more rigid pile were greater than those for smaller one. Parameters for the case of the nonhomogeneous pile were converged to the same ones of the homogeneous pile as nodal point moves away from point of material boundary. In order to determine adequate upper length of the nonhomogeneous pile, changing patterns of the parameters, lateral displacement, member forces and so forth should be compared.

Key Words : Parametric study, Nonhomogeneous pile, Flexural rigidity, Point of material boundary, Upper pile length of nonhomogeneous pile

1. 서론

콘크리트말뚝에 대해 강관말뚝이 갖는 장점은 단단한 층으로의 근입이 용이하여 지지력이 크다는 점과 그와 관련하여 시공도중 두부파손의 우려가 없는 점, 이음부 강도가 크다는 점, 말뚝길이 조절이 용이하다는 점, 상부구조물과의 연결이 쉽다는 점, 운반과 취급이 용이하다는 점 그리고 시공비와 시공시간을 절감할 수 있다는 점 등을 들 수 있다[1]. 특히 강관말뚝은 횡방향력에 대한 저항력이 커서 일찍부터 횡방향력을 받는 말뚝으로 많이 사용되어 왔다. 그러나 2004년도를 기점으로 세계적으로 원자재 값이 급등하여 강관말뚝의 가격이 상승하게 되었다. 최근 들어 유사한 말뚝규격으로 비교해 볼 때 강관말뚝의 가격은 콘크리트말뚝의 그것에 비해 3~5배에 이른다. 이러한 이유로 횡방향하중을 받는 말뚝의 상부를 강관말뚝으로 하고 하부는 콘크리트말뚝을 사용하는 불균질말뚝에 대한 사용 및 연구가 국내외적으로 있어 왔다[2,3]. 불균질말뚝의 경우 강재와 콘크리트를 쓰는 경우에는 탄성계수가 10배 정도 차이가 나는 두 개의 재료를 하나의 말뚝재료로 사용하므로 단일재료를 사용하는 말뚝

*Corresponding Author : Seung-Hyun Lee(Sunmoon Univ.)
Tel: +82-10-7278-1080 email: shlee02@sunmoon.ac.kr
Received February 26, 2013 Revised April 24, 2013 Accepted May 9, 2013

에 비하여 말뚝거동에 차이가 있을 수 있으며 무엇보다 상부말뚝의 길이를 얼마로 해야 균질말뚝을 사용하는 것과 유사한 하중지지능력이 발휘되는가 하는 점도 큰 관심거리이다. 본 연구에서는 횡방향하중을 받는 말뚝의 해석을 위해 개발된 해석기법을 이용하여 말뚝거동에 큰 영향을 미치는 매개변수연구를 수행함으로써 불균질말뚝과 균질말뚝의 하중지지거동에 미치는 매개변수의 영향을 상호 비교해 보고 궁극적으로 불균질말뚝에 있어서 적절한 상부 말뚝길이를 결정할 수 있는 근거를 제시하고자 하였다.

2. 해석기법

횡방향하중을 받는 불균질말뚝에 대한 지배미분방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{d^2}{dz^2}(R\frac{d^2y}{dz^2})+P_z\frac{d^2y}{dz^2}+E_{py}y-W=0 \quad (1)$$

식 (1)에서 z와 y는 각각 말뚝을 따르는 깊이와 횡방향변위를 의미하고 P_z, E_{py} 그리고 W는 각각 말뚝축력, 지반반력할선계수(secant modulus of subgrade reaction) 그리고 절점외력을 의미한다. R은 말뚝의 휨강성(EI)을 의미하는데 E와 I는 각각 말뚝의 탄성계수와 단면2차모멘트이다. 식 (1)을 차분식으로 나타내고 말뚝선단과 말뚝머리에서의 경계조건을 적용하면 말뚝 절점에서의 횡방향변위량을 식 (2)를 써서 구할 수 있는데 식 (2)에서 m은 절점번호를 의미한다.

$$y_m = a_m y_{m+1} - b_m y_{m+2} - c_m \quad (2)$$

식 (2)에서 계수 a_m, b_m 그리고 c_m은 말뚝의 휨강성, 말뚝축력, 지반반력 할선계수, 말뚝 절점간 거리 그리고 절점외력에 영향을 받게 된다. 계수 a_m, b_m 그리고 c_m은 일정한 지반반력할선계수를 가정하는 경우에는 말뚝선단에서의 경계조건을 적용하여 구하게 되는데 일반적으로 적용되는 말뚝선단에서의 경계조건으로 고려되는 모멘트와 전단력이 0이라는 조건을 적용하면 식 (3)~(5)와 같다.

$$a_m = \frac{B_m(1-b_{m-1})+R_{m-1}(a_{m-2}b_{m-1}-2)+2R_{m+1}}{A_m-B_m a_{m-1}+R_{m-1}(a_{m-2}a_{m-1}-b_{m-2})} \quad (3)$$

$$b_m = \frac{R_{m+1}}{A_m-B_m a_{m-1}+R_{m-1}(a_{m-2}a_{m-1}-b_{m-2})} \quad (4)$$

$$c_m = \frac{c_{m-1}(B_m-a_{m-2}R_{m-1})-R_{m-1}c_{m-2}-W_m h^4}{A_m-B_m a_{m-1}+R_{m-1}(a_{m-2}a_{m-1}-b_{m-2})} \quad (5)$$

식 (3)~(5)에서 A_m과 B_m은 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같이 표현되는데 식 (5)에서 h는 절점간의 거리를 의미한다.

$$A_m = 6R_m - 2P_z h^2 + E_{pym} h^4 \quad (6)$$

$$B_m = 2R_m + 2R_{m-1} - P_z h^2 \quad (7)$$

따라서 식 (2)~(7)을 통해 볼 때 계수 a_m, b_m 그리고 c_m이 말뚝거동을 결정짓는 주요한 매개변수임을 알 수 있는데 이러한 매개변수들은 p-y 곡선을 적용한 해석을 수행하는 경우에는 식 (6)에 나타낸 바와 같이 수정된 E_{pym}값에 의해 결정된다. 본 연구에 앞서 식 (1)에 근거하여 유한차분법을 적용한 횡방향말뚝 해석기법을 개발한 바 있으며 자세한 내용은 기존 문헌[4]을 참고할 수 있다. 개발된 해석기법을 적용하여 불균질말뚝과 균질말뚝에 있어 말뚝 근입깊이를 따르는 매개변수의 변화양상을 살펴보고자 하였다.

3. 해석조건

매개변수 연구를 위해 강관말뚝과 PHC 콘크리트 말뚝을 적용해 보았는데 각각의 제원은 Table 1에서와 같다. Table 1에서 D_0, t, A, I 그리고 E는 각각 말뚝 바깥지름, 두께, 단면적, 단면2차모멘트 그리고 탄성계수를 의미한다.

[Table 1] Pile Properties

Pile material	$D_0(mm)$	$t(mm)$	$A(cm^2)$	$I(cm^4)$	$E(kN/m^2)$
Steel pipe	500	12	184	54800	2×10^8
PHC concrete	500	80	1056	241199	2×10^7

편의상 PHC 콘크리트말뚝은 콘크리트말뚝으로 부르도록 한다. 매개변수연구를 위해 지반은 점토지반을 고려하였으며 p-y 곡선을 적용하여 해석을 수행하였다. 점토지반에 대한 p-y 곡선에 있어 초기 직선부분의 기울기를 나타내는 K_{py}는 주요한 인자중 하나인데 이의 결정을 위해 많은 이론적 접근법들이 있어 왔으나[5-9] 제한적 성과만 도출되었으며 현재까지 최선의 방법은 실험을 통해 그 값을 결정하는 것이라 할 수 있다. Reese 등[10]은 K_{py}에 관련된 실험결과들을 분석하고 그 성과를 바탕으로 평균비배수강도가 50~100kPa 범위에 있는 단단한 점토(stiff clay)에 대해 K_{py}값을 $135\mathrm{MN/m^3}$으로 제안하였다. Reese and Welch[11]는 횡방향하중을 받는 말뚝에 대한 재하시험을 수행하고 결과해석을 통해 지하수위 위에 있는 단단한 점토에 대하여 정적하중 작용시의 p-y 곡선을 제안하였다. 제안된 p-y 곡선은 크게 극한지반반력(ultimate soil resistance)의 1/2에 대응하는 횡방향변위량, y_{50}의 18배까지의 곡선부분과 이후 일정한 극한지반반력을 나타내는 두 부분으로 구성되어 있다. 극한지반반력(p_u)은 식 (8)과 식 (9)를 통해 구한 값 중 작은 값으로 한다.

$$p_u = (3 + \frac{\gamma'}{c} + \frac{J}{D}z)cD \tag{8}$$

$$p_u = 9cD \tag{9}$$

식 (8)에서 γ'은 지표면으로부터 p-y 곡선을 적용하는 깊이(z)까지의 평균 유효단위중량, c는 깊이 z에서의 비배수강도, J는 실험으로부터 결정되는 매개변수 그리고 D는 말뚝지름을 의미한다. Matlock[12]은 연약점토에 대한 J값을 0.5로 보았으며 연약점토와 단단한 점토 사이의 점토(medium clay)에 대해서는 0.25로 보았는데 주로 0.5가 사용된다. $18y_{50}$까지의 곡선부분은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\frac{p}{p_u} = 0.5(\frac{y}{y_{50}})^{0.25} \tag{10}$$

식 (10)에서 y_{50}는 식 (11)을 이용하여 결정한다.

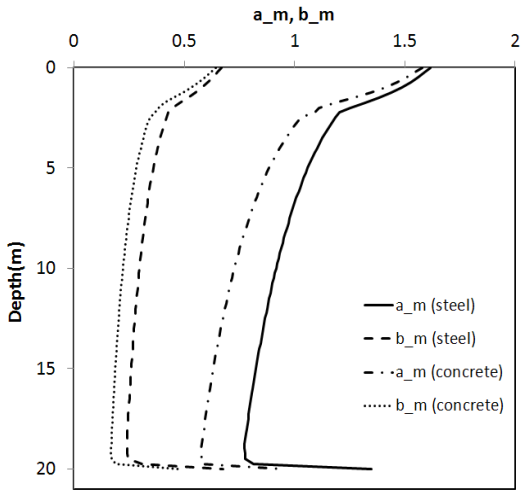
$$y_{50} = 2.5\epsilon_{50}D \tag{11}$$

식 (11)에서 ϵ_{50}는 점토에 대한 삼축시험결과로부터 최대주응력차의 1/2에 대응하는 변형률을 의미하며 시험결과가 없는 경우 비배수강도 96 ~ 192kPa에 대한 추천값은 0.005이다[13]. 해석대상지반은 지하수위 위의 단단한 점토(stiff clay)로서 비배수강도는 100kPa, 단위중량은 $19kN/m^3$, K_{py}는 $135\mathrm{MN/m^3}$ 그리고 ϵ_{50}는 0.005이다.

해석을 위한 말뚝길이는 20m로 하였으며 불균질말뚝의 상부 및 나머지 부분은 각각 Table 1에 나타낸 강관말뚝과 콘크리트말뚝이 되도록 하였다. 편의상 불균질말뚝에서 재료가 변하는 점을 재료경계점(point of material boundary)이라 명명한다. 말뚝머리 경계조건은 말뚝머리 자유조건(free head condition)으로 하였으며 $100kN$의 횡방향하중을 말뚝머리에 작용시켰다. 횡방향하중은 말뚝머리에만 작용하고 말뚝길이를 따르는 절점에는 외력이 작용하지 않는 것으로 보았으므로 이 경우 식 (2)에서 매개변수, c_m은 0이 된다. 따라서 수행된 매개변수 연구는 말뚝 근입깊이를 따르는 a_m과 b_m의 변화양상을 살펴보는 것이 된다.

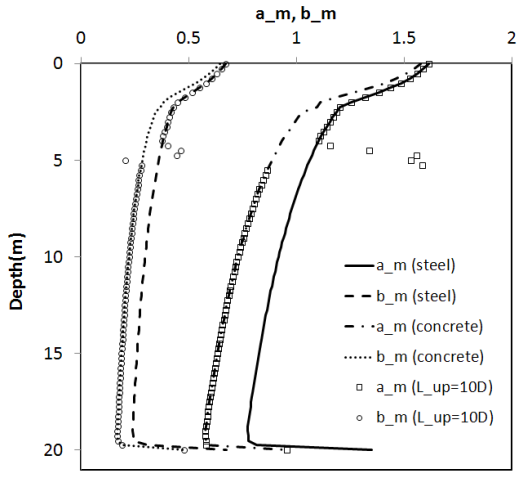
4. 해석결과

가정한 해석조건을 적용하여 먼저 말뚝재료가 각각 강관과 콘크리트인 균질말뚝에 대해 해석을 수행하고 근입깊이에 따른 a_m, b_m를 계산해보면 Fig. 1과 같은데 Table 1로부터 강관말뚝과 콘크리트 말뚝의 휨강성은 각각 $10960kN\cdot m^2$ 및 $4824kN\cdot m^2$ 로 계산된다.



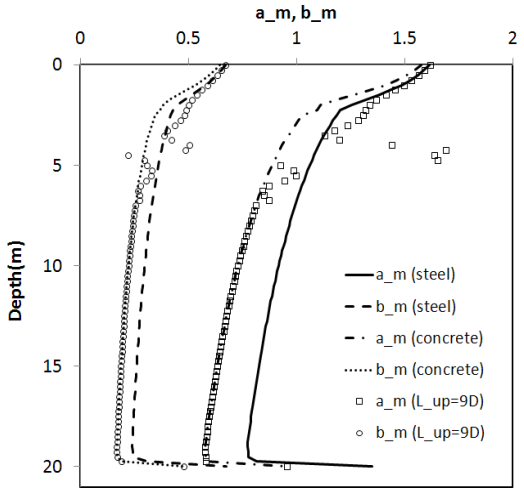
[Fig. 1] a_m, b_m with depth(homogeneous pile)

Fig. 1을 통해 알 수 있듯이 두 개의 균질말뚝에 있어 깊이에 따른 a_m, b_m 값의 변화양상은 비슷함을 알 수 있으며 휨강성이 큰 강관말뚝의 경우 a_m, b_m 값이 콘크리트말뚝에 비해 큼을 알 수 있다. 불균질말뚝의 깊이에 따른 a_m, b_m 값의 변화양상을 살펴보기 위해 말뚝머리로부터 재료경계점까지의 깊이(L_{up})를 말뚝지름(D)의 10배($L_{up}=10D$)인 5m로 하여 깊이에 따른 a_m, b_m 값을 나타내 보았는데 Fig. 2와 같다. Fig. 2에는 비교의 목적으로 균질말뚝의 경우에 대한 a_m, b_m 값도 함께 나타내었다.



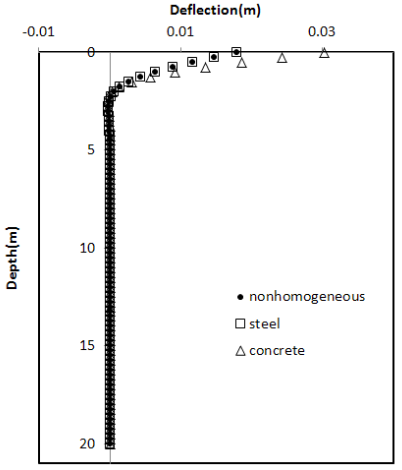
[Fig. 2] a_m, b_m with depth(nonhomogeneous pile, $L_{up}=10D$)

Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 불균질말뚝의 경우 예견되는 대로 재료경계점 근처에서 a_m, b_m 값이 급격히 변함을 알 수 있다. 이러한 변화는 휨강성의 급격한 차이로 인해 발생된 것으로 유한차분법에 있어 계산상 큰 오차를 유발하므로 재료경계점 근처에서는 해석결과의 신뢰성이 떨어지게 된다. 재료경계점을 기준으로 하여 말뚝의 상하로 멀어짐에 따라 a_m, b_m 값은 균질말뚝의 값들에 수렴됨을 알 수 있다. 즉, 5m 깊이를 기준으로 상부로 갈수록 불균질 말뚝의 a_m, b_m 값은 균질 강관말뚝의 그것들과 같은 값에 수렴되어 감을 알 수 있으며 하부로 갈수록 불균질 말뚝의 a_m, b_m 값은 균질 콘크리트말뚝의 그것들과 같은 값에 수렴됨을 알 수 있다. 매개변수연구를 위해 적용한 해석기법에서는 p-y 곡선을 적용함에 있어 지반반력 할선계수를 반복계산을 통해 수정할 경우 전후 계산시의 절점변위에 대한 허용오차(tolerance)를 0.1mm로 하였다. 불균질말뚝의 재료경계점까지의 깊이를 말뚝지름의 8배인 4.0m로 했을 경우 해석결과는 발산하였으며 불균질 말뚝의 재료경계점까지의 깊이를 말뚝지름의 9배인 4.5m로 했을 경우 해석결과는 수렴하였으며 말뚝 근입깊이에 따른 a_m, b_m 값의 변화양상은 Fig. 3과 같다.

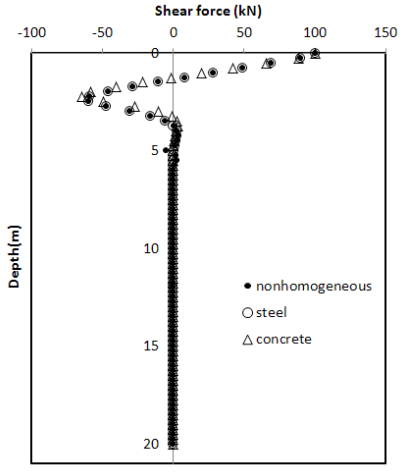


[Fig. 3] a_m, b_m with depth(nonhomogeneous pile, $L_{up}=9D$)

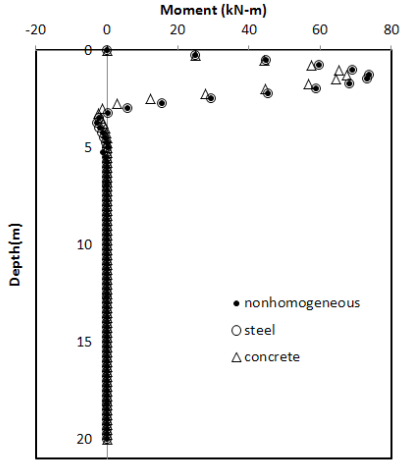
Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 불균질말뚝의 깊이에 따른 a_m, b_m 값의 변화양상은 Fig. 2에서와 같은 양상을 보인다고 볼 수 있는데 상부말뚝길이가 충분하지 못하여 지표면 근처에서만 균질말뚝의 a_m, b_m 값에 수렴함을 알 수 있다. Fig. 2와 Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 불균질말뚝을 이용하고자 할 경우 균질말뚝의 거동과 유사한 횡방향하중지지능력을 발휘하기 위해서는 재료경계점 상부에 있어 a_m, b_m 값이 균질말뚝의 값에 수렴되어야 하며 말뚝머리 횡방향변위와 부재력 등에 있어 균질말뚝과 불균질말뚝의 해석결과가 비슷해야 할 것이다. 불균질말뚝의 재료경계점 깊이가 말뚝지름의 10배인 경우에 대하여 해석을 통해 구한 말뚝머리변위와 말뚝부재력 등을 나타내면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에는 비교를 위해 균질말뚝에 대한 해석결과도 함께 나타내었다.



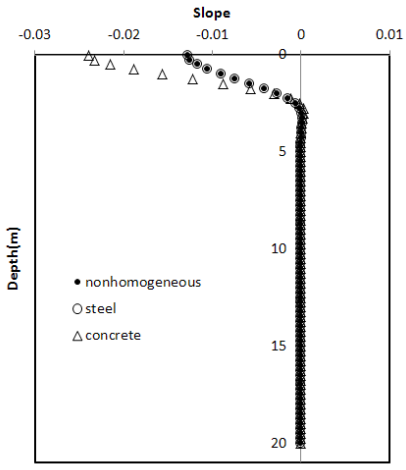
(a) Pile head deflection



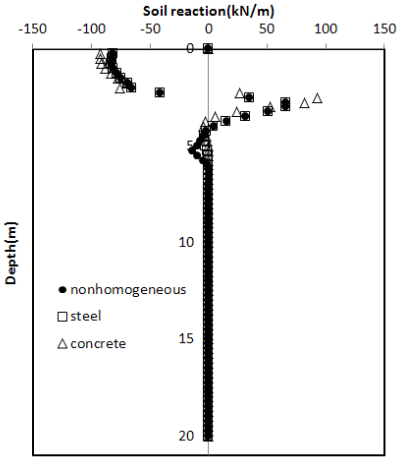
(b) Shear force



(c) Moment



(d) Slope



(e) Soil reaction

[Fig. 4] Results of analysis for laterally loaded pile

Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 불균질말뚝의 상부 강관말뚝길이가 말뚝지름의 10배인 경우 재료경계점 상부에 있어서의 해석결과가 균질 강관말뚝의 해석결과와 전체적으로 거의 일치함을 알 수 있다. 콘크리트말뚝의 경우 횡방향변위량은 균질 강관말뚝 및 불균질말뚝에 비해 큼을 알 수 있으며 그에 따라 경사(slope)에 있어서도 뚜렷한 차이를 보이는데 말뚝부재력 및 지반반력분포에 있어서는 균질 강관말뚝과 불균질말뚝 사이에 별 차이가 없다.

5. 결론

점토지반에서 횡방향하중을 받는 불균질말뚝에 있어

적절한 상부말뚝길이 결정을 위한 매개변수연구를 수행하였다. 매개변수연구에서 고려한 2개의 균질말뚝에 있어 말뚝 근입깊이에 따른 매개변수는 휨강성이 클수록 크게 계산되었다. 불균질말뚝에 대해 계산된 매개변수는 재료경계점에서 멀어짐에 따라 동일한 휨강성을 갖는 균질말뚝의 매개변수에 수렴함을 알 수 있었다. 균질말뚝과 불균질말뚝의 매개변수 변화양상과 해석을 통해 얻는 횡방향변위 및 부재력 등을 종합적으로 비교하여 균질말뚝과 유사한 하중지지능력을 발휘할 수 있도록 하는 적절한 불균질말뚝의 상부길이를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] JASPP, *Steel Pipe Pile*, Japanese Association for Steel Pipe Piles, 1987.

[2] T. J. Hwang, "Analysis of Composite Pile Behavior under Lateral Loadings", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 1396-1404, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.1396

[3] Ishida et al., "Static Horizontal Loading Test of Steel and Concrete Composite Pile Group", *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, Architectural Institute of Japan, pp.591-598, 2002.

[4] Lee, S. H., Kim, B. I., "Development and Evaluation of Technique for Analyzing Laterally Loaded Piles", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 2C, pp. 79-84, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.1.079

[5] Vesić, A. S., "Bending of beams on isotropic elastic solids", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 87, Paper No. EN2, April, pp. 35-63, 1961.

[6] Thompson, G. R. *Application of the Finite element method to the development of p-y curves for saturated clays,* Thesis, Master of Science in Civil Engineering, University of Texas at Austin, 1977.

[7] Kooijman, A. P., "Comparison of an elastoplastic quasi three-dimensional model for laterally loaded piles with field tests", *Proceedings, Third International Symposium, Numerical Models in Geomechanics*, Elsevier Applied Science, New York, pp. 675-682, 1989.

[8] Yegian, M., and Wright, S. G., "Lateral soil resistance-Displacement relationships for pile foundations in soft clays", *Proceedings, Offshore Technology Conference*, Houston, TX, Paper No. 1893, pp. 663-676, 1973.
DOI: http://dx.doi.org/10.4043/1893-MS

[9] Brown, D. A., Shie, C. F., and Kumar, M., "p-y curves for laterally loaded piles derived from three-dimensional finite element model", *Proceedings, Third International Symposium, Numerical Models in Geomechanics*, May, Elsevier Applied Science, New York, pp. 683-690, 1989.

[10] Reese, L. C., Cox, W. R., and Koch, F. D., "Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay",, *Proceedings, VII Annual Offshore Technology Conference*, Houston, TX, Vol. 2, Paper No. 2312, pp. 672-690, 1975.
DOI: http://dx.doi.org/10.4043/2312-MS

[11] Reese, L. C., and Welch, R. C., "Lateral loading of deep foundations in stiff clay", Proceeding, ASCE, Vol. 101, No. GT7, February, pp. 633-649, 1975.

[12] Matlock, H., "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay", *Proceedings, Offshore Technology Conference,* Houston, Texas, Paper No. 1204, pp. 577-594, 1970.
DOI: http://dx.doi.org/10.4043/1204-MS

[13] Reese, L. C., Isenhower, W. M., and Wang, S. T., *Shallow and deep foundations*. John Wiley & Sons Inc., pp. 430-435, 2006.

이 승 현(Seung-Hyun Lee) **[정회원]**

- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학