

지반-구조물간 경계면 효과를 고려한 BARRETTE 말뚝의 거동 Soil-Structure Interface Effects on Barrette Pile Behaviors

이상래¹⁾, Sang-Rae Lee, 박성완²⁾, Seong-Wan Park, 임대성³⁾, Dae-sung Lim

¹⁾ 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Master student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University.

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

³⁾ 삼보E&C(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Technical Research Center, Sambo E&C

SYNOPSIS : Recently, the use of barrette pile is remarkably increased specially for high-rise building and bridge foundations. However, on the contrary, very few studies have been made for analyzing barrette pile behavior considering interface behavior between pile and soils around. Therefore, in this paper, these effects are evaluated by using the 3-dimensional non-linear finite element method with the results of full-scale pile load test from the fields. In addition to that, the selection of proper stiffness modulus on the pile interface is discussed.

Keywords : Barrette pile, Interface, Stiffness modulus, Foundations

1. 서론

최근 들어 초고층 건물과 대형 교량의 건설이 증가함에 따라 대구경 현장타설말뚝에 대한 필요성이 크게 대두 되고 있다. 기존의 대구경 현장타설말뚝은 시공상 문제, 고가의 시공비, 소음 및 진동 등의 문제로 도심지 공사에 따른 문제점이 빈번히 대두 되었으나 많은 연구결과와 개선된 시공실적을 바탕으로 대형공사의 기초형식으로 사용되고 있는 실정이다. 기초 시공 대상 부지의 지지층이 깊어 원형 Casing 사용으로 인한 말뚝의 시공성이 어렵고 비경제적인 경우 벤토나이트 슬러리를 이용한 Barrette 말뚝은 대구경 원형 현장타설말뚝의 대안으로 제시되고 있다.

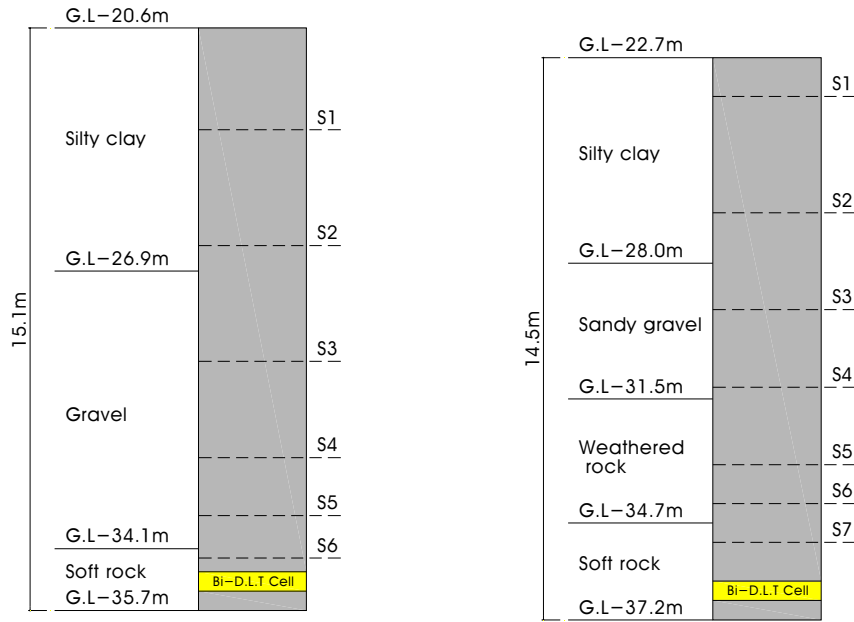
따라서, 본 연구에서는 실물크기의 Barrette 말뚝 2개소(A-현장(2.8m×1.0m), B-현장(2.8m×1.0m))의 현장시험을 토대로 주변부의 하중침하곡선을 산정하고 그 결과에 대한 검증을 위하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 또한, Barrette 말뚝은 벤토나이트 슬러리를 사용하여 시공되는 특성으로 지반과의 경계면(경계면효과) 효과를 수치해석을 통하여 모사하고 그 적용 범위를 제시하였다.

2. 현장재하시험

2.1 현장 개요

본 연구 대상 현장은 2개 현장으로 A-현장의 대상부지는 상부층에 매립층 및 실트층이 약 20m 깊이로 분포하고 Barrette 말뚝의 시공시점부터 실트질점토층, 자갈층과 연암반층이 존재한다. 말뚝은 암반에 1.6m 소켓되었고, 하중을 가하기 위한 유압식 잭은 말뚝 선단 상부 0.5m에 위치하였다. B-현장은 상부 토사층이 약 16m 깊이로 존재하며, 그 이후에 실트질점토층과 모래자갈층, 암반층이 존재한다. 말뚝은

암반에 4m 소켓되었고, 하중을 가하기 위한 유압식 잭은 연암층 지지 선단 0.5m 상부에 시공되었다. 그림 1은 말뚝이 근입된 지층 및 시험말뚝의 모사도를 나타내고 있으며, 표 1에는 시험말뚝의 제원을 표시하였다. 시험은 ASTM D1143 기준에 따라 말뚝재하시험을 수행하였다.



(a) A-Site

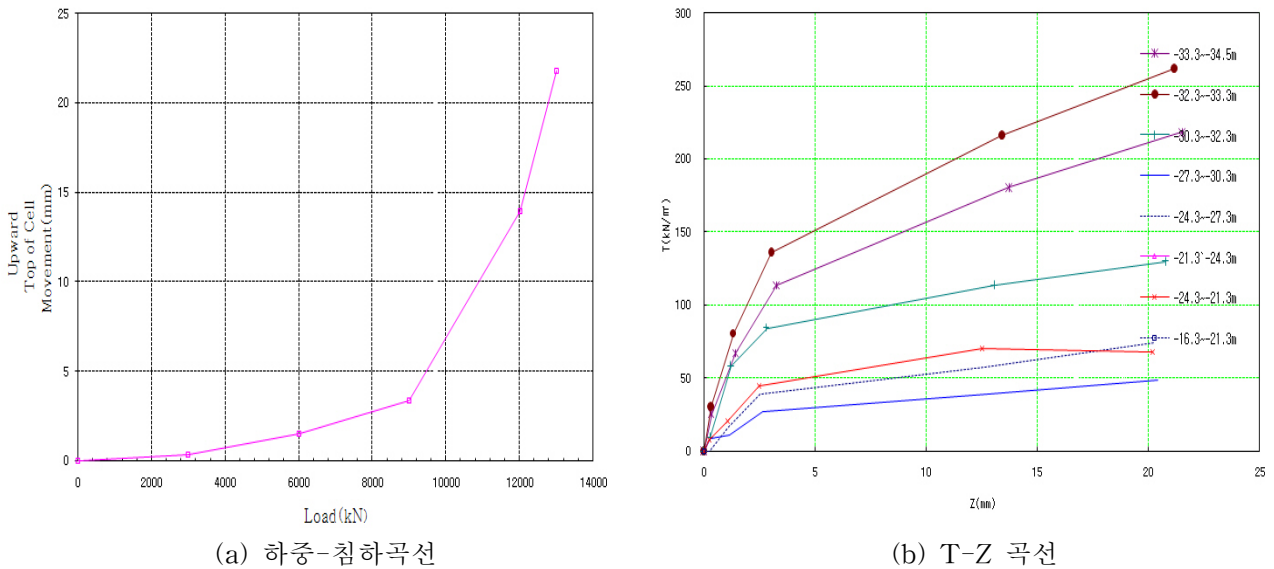
(b) B-site

* Bi-D.L.T Cell: 양방향재하시험셀, S: 변형률 센서

그림 1. 시험 말뚝 시공 현황

2.2 재하 시험 결과

말뚝의 양방향재하시험은 하중 단계별 침하량을 확인하기 위하여 반복주기 재하방법을 병행하여 재하시험을 실시하였다. 그림 2는 시험말뚝에 재하된 하중에 따른 주변부 변위를 나타낸 것이다.



(a) 하중-침하곡선

(b) T-Z 곡선

그림 2. 현장재하시험결과

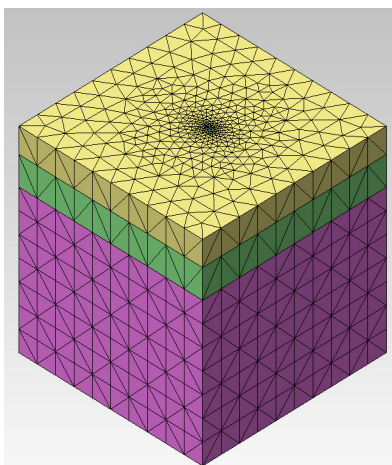
그림 2는 시험하중단계별 하중-침하곡선과 하중에 따른 깊이별(지층별) T-Z 곡선을 산정하여 도시한 결과이다. 시험결과 일방향 재하하중 13,000kN에 도달하여도 기준 침하량에 미치지 않는 것으로 보아 설계지지력을 만족하는 것으로 나타났다. 이와 같이 시험 대상 Barrette 말뚝의 경우 주변지지력이 충분히 발휘되는 것으로 나타났으나 실 설계에서는 그 불확실성에 의존하여 선단지지력만으로 설계를 하는 실정이다. 또한 현장에서 구한 T-Z 곡선을 살펴보면 모래질 자갈층에서 대부분의 주변마찰력을 발휘하고 실트질 모래층에서는 적은 양의 주변마찰력을 발휘하는 것으로 나타나 하중 재하시 토사층에서도 하중의 상당부분을 주변에서 저항하는 것으로 나타났다.

3. 수치해석

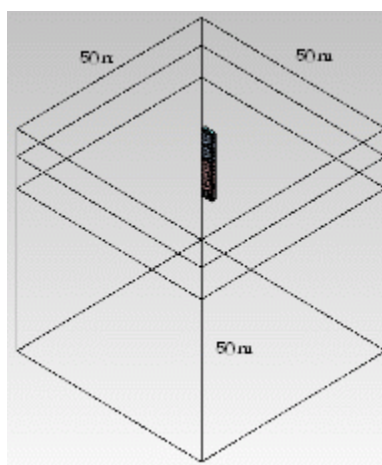
본 논문에서는 범용 3차원 비선형 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-GTS 3D를 사용하여 Barrette 말뚝에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석조건은 말뚝구조체의 경우 탄성모델을 적용하였고, 지반은 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르는 탄소성 모델을 적용하였다. 말뚝의 거동해석시 평면변형을 조건이 적용되는 2차원으로 해석할 경우 단계별 하중재하에 따른 정확한 지지거동 및 하중전이 특성의 파악이 어려운 관계로 단일 Barrette 말뚝에 대한 3차원 모형해석을 수행하였다. 또한 말뚝과 지반과의 슬립효과를 고려하기 위하여 경계면 요소를 적용하였다. 해석순서는 원지반과 말뚝을 동시에 모형화하고 응력상태를 초기상태로 안정화한 후 재하하중을 단계별로 나누어 실행하였다. 전체적인 모형 및 요소망은 그림 3과 같다.

표 2. 대표 현장 수치해석 입력 물성치

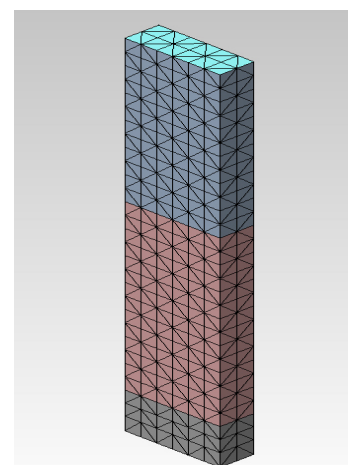
구 분	γ_t (kN/m^3)	C (kN/m^2)	$\phi(^{\circ})$	E (kN/m^2)	ν
실트질점토층	18	30	25	18000	0.35
모래질자갈층	20	0	37	160000	0.3
연암층	28	50	40	37000000	0.25
말 뚝	23	-	-	25000000	0.17



(a) 수치해석모델링



(b) 요소내 말뚝 모사도



(c) 말뚝부 요소망

그림 3. 수치해석 모델링 및 요소망

3.1 경계면효과 요소

말뚝과 지반의 경계면 상호작용으로 인한 슬립을 모사하기 위해 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르는 경계면요소를 사용하였다. 본 해석은 물성이 서로 다른 재료나 큰 강성차를 갖는 재료 간 발생하는 미끄러짐을 허용할 수 있도록 경계면요소를 사용하였고 경계면요소는 수직강성 k_n 과 전단강성 k_s 으로 구성되며 경계면 요소에서 강성을 산정하는 방법은 식 1, 2와 같다.

$$F_n = k_n u_n \quad (1)$$

$$F_s = k_s u_s \quad (2)$$

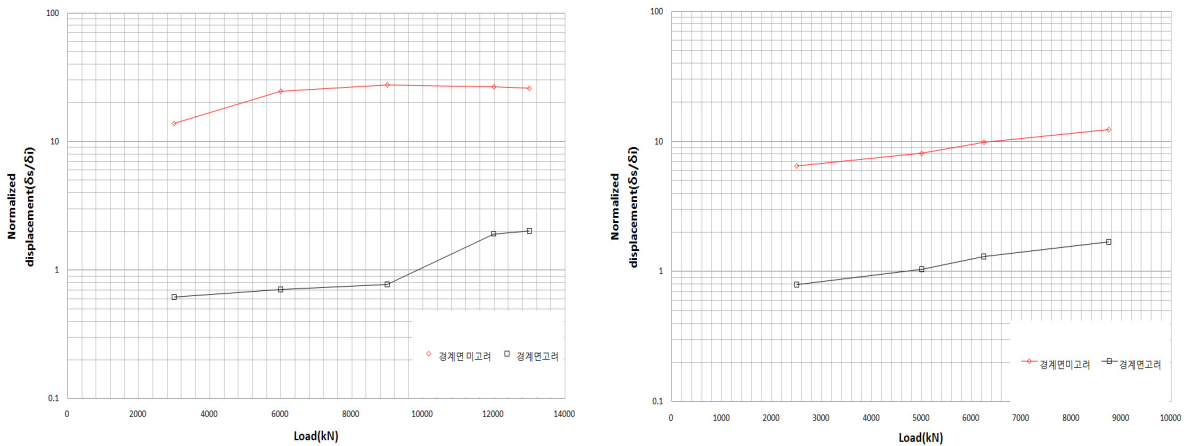
여기서, $k_n = \frac{F_n}{u_n}$, $k_s = \frac{F_s}{u_s}$

F_n, F_s : 수직 및 접선방향 하중, u_n, u_s : 수직 및 접선방향 상대변위

3.2 수치해석결과

3.2.1 경계면 적용 효과

본 연구에서는 먼저 말뚝의 주변부와 지반사이 경계면효과의 적용이 말뚝의 하중-침하곡선산정에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 경계면효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 수치해석을 실시하였고 그 결과는 그림 4와 같다.



(a) A - Site

(b) B - Site

그림 4. 경계면효과 적용에 따른 하중-침하곡선의 변화

그림 4는 하중단계별 침하량을 정규화한 그래프로 Y축은 δ_s (현장 침하량)/ δ_i (수치해석상 침하량)으로 정규화 하였으며, X축은 하중단계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 수치해석을 할 때에 경계면효과를 고려한 수치해석결과는 현장결과와 1~2배의 차이를 보이는 반면 경계면효과를 고려하지 않은 수치해석결과는 7~10배의 차이를 보여 현장의 하중-침하곡선을 수치해석으로 추정할 시에는 경계면효과효과를 고려한 결과가 현장결과와 근사한 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타난다.

3.2.2 경계면 강성도 효과

본 연구에서는 말뚝과 지반의 미끄러짐 효과를 모사하기 위하여 T-Z곡선을 통해 탄성영역(Elastic mode), 소성영역(Plastic mode), 활선영역(Tangential mode)으로 나누어 해석하였다. 본 해석시에는

T-Z curve에서 산정한 세 개의 전단 스프링 강성을 각각 해석시에 적용하여 스프링강성에 대한 차이를 분석하였고, 접선방향 스프링 강성 k_n 은 k_s 는 Belytschco(1984)가 적용한 k_s 의 2~1000배의 경험적 제안식을 적용하여 분석하였다. 각각의 경우에 따른 결과를 그림 6에 나타내었다.

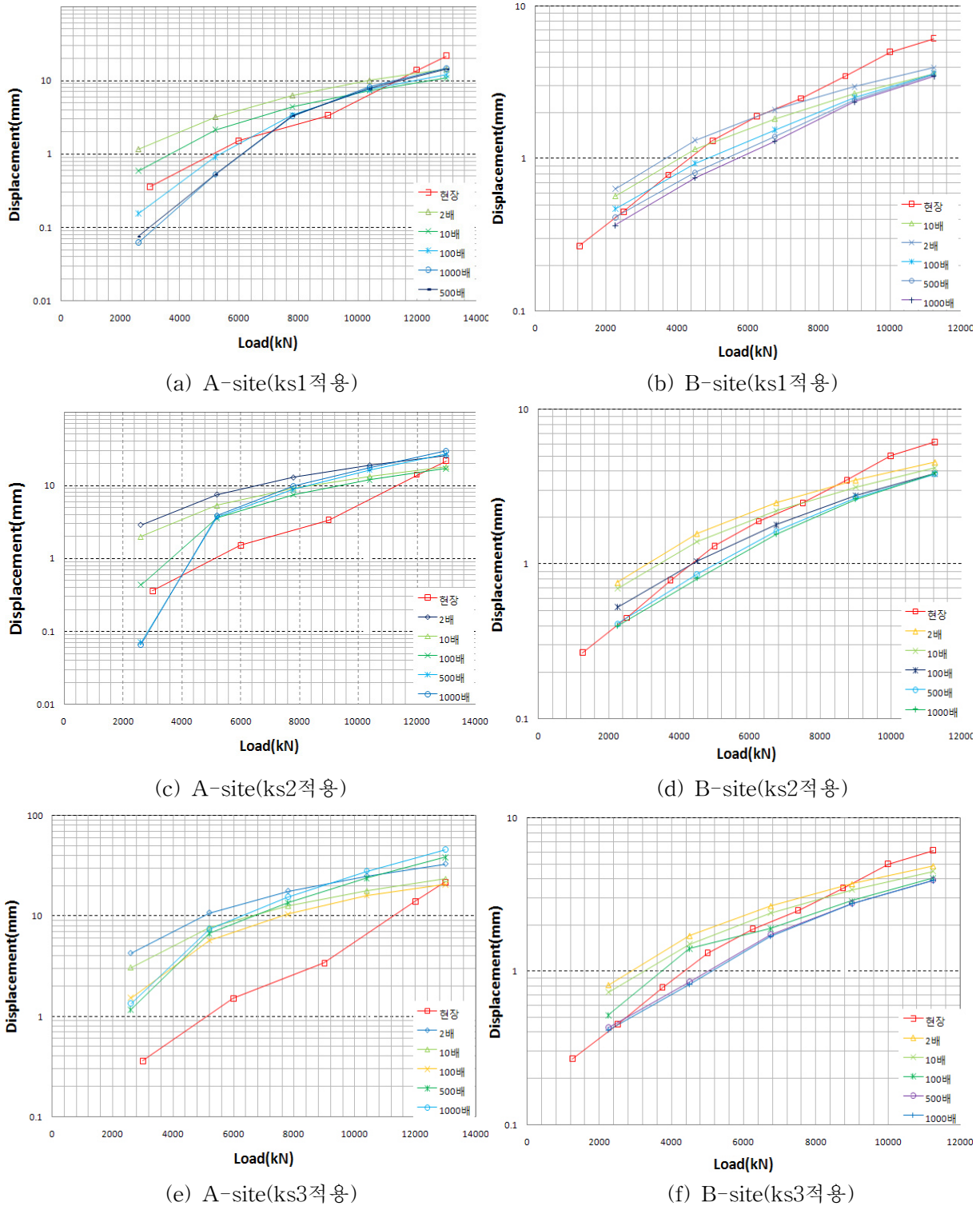


그림 5. 강성도에 따른 하중-침하 곡선

지반과 말뚝의 미끄러짐을 모사하기 위해서는 침하 거동시 발생하는 다일러턴시를 고려한 k_s 값의 변화를 변위별로 고려하여야 하나 실질적으로 수치해석에 적용하는데 어려움이 따르고 깊이별 k_s 값의 변화를 일일이 적용할 수 없는 관계로 그림 6에 도시한 결과와 같이 현장제하시험에서 구한 T-Z곡선을

통해 구한 각각의 영역에 따른 ks를 구하여 경계면효과 강성도를 적용하였으며 그 결과 전반적으로 현장결과와 유사한 결과를 예측하는 것으로 나타났다. 또한, T-Z곡선에서 구한 할선영역의 ks값(ks3)을 적용한 결과를 살펴볼 때 해석상 모두 안정측인 하중-침하 곡선을 예측하고 있어 최종 하중 단계시 침하를 예측하는데 유용할 것으로 사려된다.

또한, 접선면 강성도인 kn값은 기존 문헌에서 제시한 경험치를 근거로 ks값의 2~100배를 적용하였으며 본 연구에서 해석한 결과도 2~100배 사이의 적용이 현장 결과값과 유사한 거동을 나타냈으며 그중 접선면강성도(kn)가 전단강성도(ks)의 10~100배 사이를 적용한 결과가 가장 근사한 결과를 보이는 것으로 나타나 수치해석상 하중-침하곡선을 예측하는데 적절한 범위임을 알 수 있었다.

4. 종합

본 논문은 2개의 실규모 Barrette 말뚝에 대해 현장 양방향재하시험을 실시하였으며 Barrette 말뚝의 경계면효과를 살펴보고자 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 이를 현장재하시험결과와 비교·분석하였으며 부분적인 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 현장 양방향재하시험 결과를 토대로 하중-침하곡선에 대한 수치해석을 실시한 결과 경계면효과에 적용된 강성도는 T-Z곡선을 이용하여 전단강성도(ks)와 접선강성도(kn)를 산정하는 방법을 적용하였으며 현장결과와 비교적 유사한 결과를 얻는 것으로 나타났다.

(2) 경계면효과를 고려한 해석과 고려하지 않은 해석을 비교한 결과 경계면효과를 고려한 해석이 현장결과와 1~2배의 차이를 보이거나 고려하지 않은 해석시에는 7~10배의 차이를 보여 경계면효과를 고려한 해석이 보다 정확한 하중-침하곡선을 얻을 수 있었다.

(3) T-Z곡선에서 구한 탄성영역, 소성영역, 할선영역의 기울기를 전단강성도(ks)로 적용하였을 때 현장결과와 비교적 유사하게 나타났으나 변위에 따른 다일러턴시를 고려한 해석은 그 시간과 과정이 복잡하여 안정적인 해석을 위해 할선영역의 강성도(ks)를 적용하는 것이 합리적인 예측결과를 보이는 것으로 나타났다.

(4) 접선강성도(kn)의 적용은 기존 문헌에 제시한 바와 같이 ks의 2~1000배를 사용하였으며 이는 본 해석결과와도 잘 부합하는 것으로 나타났으며 이중 ks의 10~100배 사이의 값을 사용하는 것이 가장 근사한 해석결과를 나타내었다.

참고문헌

1. 최진오, 권오성, 김명모(2000), “지반-구조물간 상호작용을 고려한 암반에 근입된 현장타설말뚝의 거동”, 한국암반공학회지, 제 10호, pp 457-468.
2. Belytschko(1984), "A computer method for stability analysis of caverns in jointed rock", *International journal for numerical method in Geomechanics*, Vol. 8, pp 473-492.
3. Cundall, P. A.(1976), "Explicit finite difference methods in geomechanics" , In numerical methods in engineering, *Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Blacksburg, VA, Desai, C. S. Vol. 1, pp 132-150.
4. Midas Information Technology(2008), MIDAS-GTS ver.2.5.0 , User's manual
5. Osterberg, J. O. (1998), The Osterberg Load Test method for Drilled Shafts and Driven Piles-the First Ten Years. *Proceedings 7th International Conference on Deep Foundations*, Vienna, Austria., June 15-17, Deep Foundation Institute, Englewood Cliffs, N.J
6. O'Neill, M. W. and Reese, L. C. (1999), Drilled Shafts : *Construction Procedures and Design Methods*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-IF-99-025