

말뚝 지지력 산정에 이용되는 한계깊이 개념에 대한 고찰



김 성 렬
동아대학교 토목공학부
조교수
(sungryuk@dau.ac.kr)



정 성 교
동아대학교 토목공학부
교수
(sgchung@dau.ac.kr)

1. 서론

사질토 지반에 근입된 말뚝의 주면 마찰력과 선단 지지력을 산정할 때 한계깊이(critical depth)라는 개념이 있다. 한계깊이는 말뚝의 주면마찰력과 선단지지력이 깊이에 따라 점차 증가하다가 더 이상 증가하지 않고 일정해지는 깊이로 정의한다. 이 한계깊이는 보통 $10\sim 20D$ (D 는 말뚝직경)의 깊이로 가정하고 있다(그림 1 참조).

‘구조물 기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)’에서는 한계깊이를 $20D$ 로 제안하고 있다. 이에 따르면 말뚝의 직경이 60cm 인 경우 한계깊이는 약 12m 가 되고 이 깊이 아래의 선단지지력과 주면 마찰력은 더 이상 증가되지 않고 12m 에서의 값과 동일하게 된다.

흙의 유효응력은 깊이가 깊어짐에 따라 증가하며,

흙의 전단저항력은 유효응력에 비례하여 계속적으로 증가하는 것은 기본적인 사실이다. 말뚝지지력 또

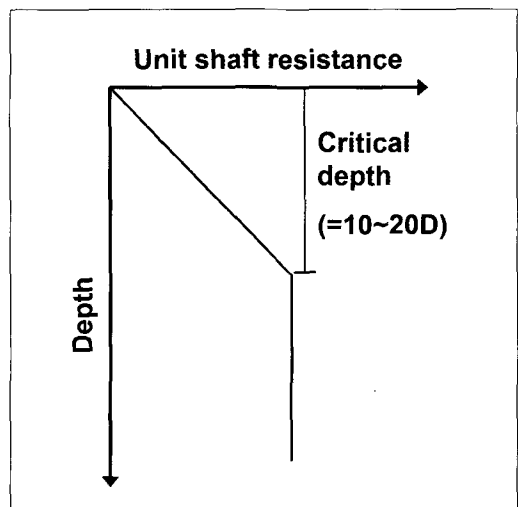


그림 1. 한계깊이 개념에 의한 단위주면마찰력 분포

한 유효응력에 비례하여 계속적으로 증가해야 함에도 불구하고 지지력이 특정깊이에서 일정해진다는 한계깊이의 제안배경은 명확히 알려져 있지 않다.

한계깊이와 관련된 국내의 시방기준을 살펴보면, 'Foundations and Earth Structures (NAVFAC, 1986)', 'Design of Pile Foundations (US Army Corps of Engineers, 1991)', '지반공학시리즈4 '깊은기초(한국지반공학회, 2002)'의 일부내용, '구조물 기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)' 등에 한계깊이 개념이 언급되어 있다. 그러나, 최근의 국외 시방기준인 '건축기초구조설계지침(일본건축학회, 2001)', 'Canadian Foundation Engineering Manual (CGS, 2006)', 그리고 'LRFD Bridge Design Specifications (AASHTO, 2007)' 등과 국내 시방기준들 중 '도로교설계기준 해설 하부구조편(대한토목학회, 2001)'와 '도로교설계기준(한국도로교통협회, 2005)' 등은 한계깊이 개념을 적용하고 있지 않다. 이와 같이, 최근 국외 설계기준에서는 한계깊이 개념을 더 이상 적용하지 않는데 반하여 국내 설계기준에서는 아직 혼용되어 사용되고 있다. 또한, 국내 대부분의 기초공학 강의교재에서 한계깊이 개념을 적용하도록 하고 있다.

그러므로, 국내 말뚝설계기준의 정립을 위하여 한계깊이 개념이 제안된 배경을 살펴보고, 현장 재하시험 사례분석을 통하여 그 존재여부를 검증하는 것이 필요하다. Fellenius 등(1995)은 한계깊이의 유래, 발생원인 그리고 그 오류에 대하여 지적해와 있다. 본 기술기사에서는 그 내용을 소개하면서 기존의 재하시험 사례와 낙동강 하구 대심도 연약지반에 항타 관입되었던 PHC 말뚝의 재하시험 사례를 분석하여 한계깊이 개념의 오류를 지적하고자 한다.

2. 한계깊이 개념의 제안배경 및 오류

한계깊이 개념은 Vesic(1964, 1970, 1977)와 Meyerhof(1976)가 말뚝 현장시험 결과에 근거하여 처음으로 제안하였다. Vesic(1970)가 수행한 현장시험의 단위 주면마찰력 분포는 그림 2와 같다. 그림을 보면, 단위주면마찰력이 깊이에 따라 증가하다가 최대값에 도달한 후 감소한다. 단위주면마찰력이 최대가 되는 깊이를 한계깊이로 정의한다. 이 한계깊이 아래의 단위주면마찰력이 감소하는 원인은 말뚝관입시 말뚝선단 인근지반에 발생한 변위 때문으로 설명하였다. 이후의 여러 연구자들이 비슷한 연구결과를 발표하면서 이 한계깊이 개념은 빠르게 인정되었고 일반적인 사실로 받아들여졌다.

Fellenius 등(1995)은 단위주면마찰력이 이러한 분포를 보이는 이유가 말뚝 재하시험전 말뚝체 내에 존재하고 있던 잔류하중(residual load)을 고려하지

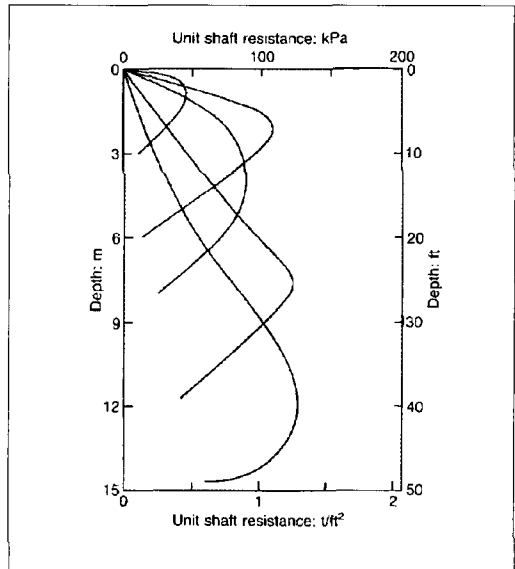


그림 2. 단위주면마찰력 분포(Vesic, 1970)

않았기 때문에 분석하고 있다. 주면마찰력의 극한 값은 수 mm의 미소한 지반침하에서도 발생할 수 있기 때문에, 잔류하중은 말뚝설치시의 지반교란, 설치이후의 setup 현상 등으로 항타말뚝과 천공말뚝에 상관없이 모든 말뚝에서 존재할 수 있다.

본 연구에서는 말뚝 잔류하중이 재하시험의 축하중 분포형태에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 3 과 같은 하중분포곡선을 가정하였다. 여기서, 말뚝은 균질한 사질토 지반에 근입되었고, 주면마찰력이 유효응력에 비례하여 증가한다고 가정하였다. 그림에서 'Residual' 곡선은 말뚝 재하시험전 말뚝체 내에 존재하고 있던 잔류하중을 나타낸다. 'FALSE' 곡선은 거짓 지지력 곡선으로 국내 말뚝재하시험에서 일반적으로 수행하는 바와 같이 재하시험전의 잔류하중을 무시하고 재하시험만으로 얻어진 하중분포곡선이다. 그리고, 'TRUE' 곡선은 재하시험전 'Residual' 곡선과 재하시험의 'FALSE' 곡선의 하

중을 더한 하중분포곡선으로서 지반의 참지지력 (True resistance)을 나타내는 곡선이다. 'FALSE' 곡선은 지반상부에서 주면마찰력이 크게 발휘되고 잔류하중이 최대가 되는 깊이 아래에서 저항력이 일정해지는 S자형 분포형태를 보여준다.

그림 4는 그림 3의 'TRUE' 와 'FALSE' 곡선으로부터 단위주면마찰력을 산정한 것이다. 'TRUE' 곡선의 경우 주면마찰력이 깊이에 비례하여 증가한다고 가정하였으므로 단위주면마찰력이 깊이에 따라 선형적으로 증가한다. 그러나, 잔류하중을 무시하여 얻어진 'FALSE' 곡선의 단위주면마찰력은 중앙부에서 최대가 되고, 그 아래로 점차 감소하는 형태를 보여준다.

그림 3에서 'FALSE' 곡선의 하중분포형태는 잔류하중을 무시함으로써 S자형 형태를 보이게 되고, 이로 인해 그림 4에서 보는 바와 같이 실제 존재하지 않는 한계깊이가 발생하는 것이다. 또한, 'FALSE' 곡

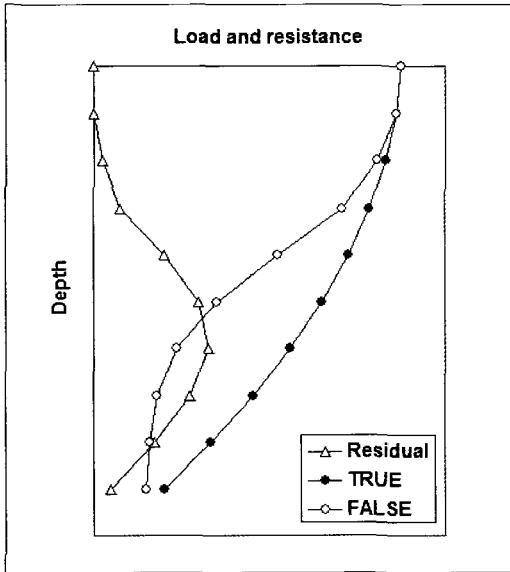


그림 3. 말뚝 잔류하중이 축하중 분포에 미치는 영향

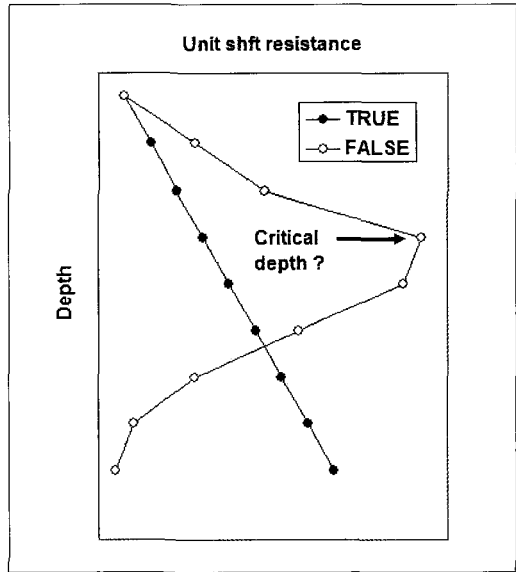


그림 4. 말뚝 잔류하중 고려여부에 따른 단위주면마찰력의 비교

말뚝 지지력 산정에 이용되는 한계깊이 개념에 대한 고찰

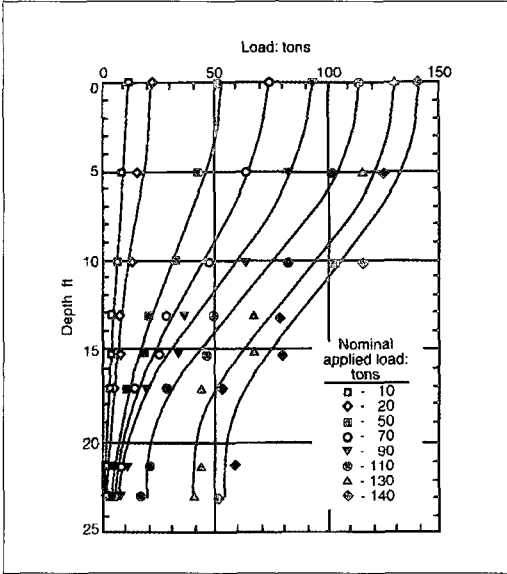


그림 5. 천공말뚝의 축하중 분포 곡선 (Reese 등, 1976)

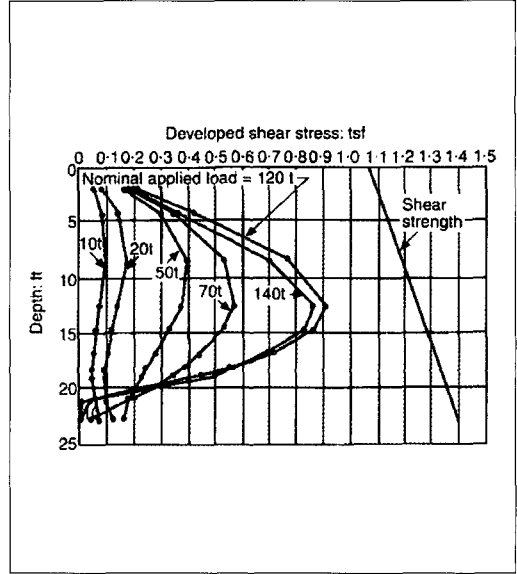


그림 6. 단위주면마찰력의 분포 (Reese 등, 1976)

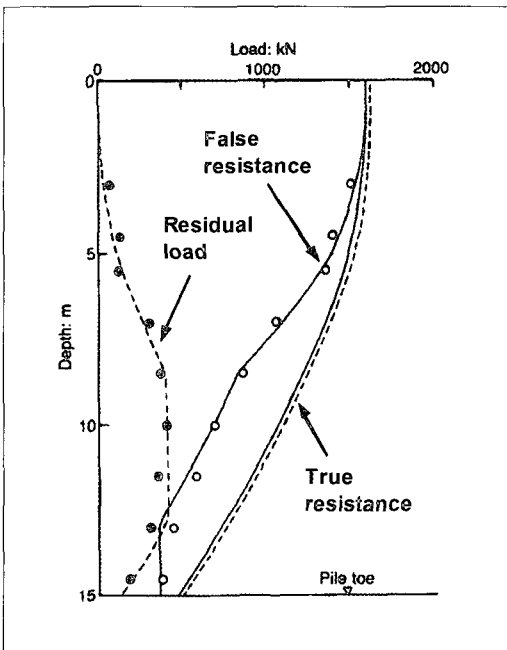
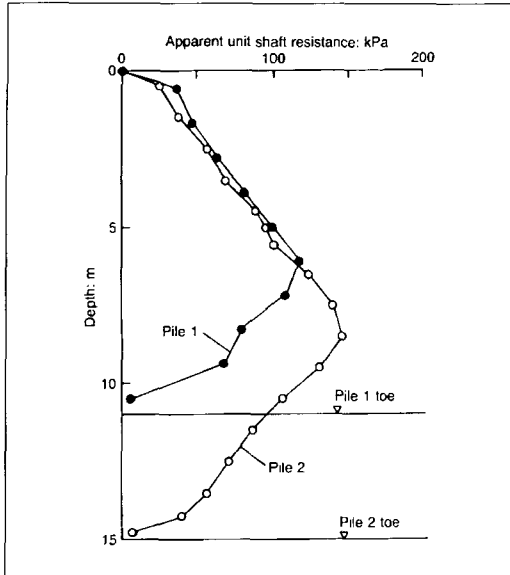


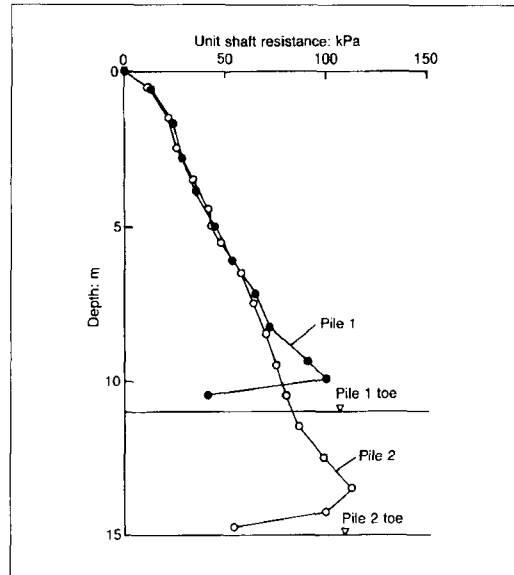
그림 7. 균질한 사질토 지반에 근입된 15m 길이 말뚝의 축하중 분포곡선 (Altaee 등, 1993)

선은 잔류하중을 무시함으로써 주면마찰력을 과대평가하고 선단지지력을 과소평가하게 되므로 정밀한 하중전이 시험을 수행하더라도 주면마찰력과 선단지지력의 크기를 잘못 예측하는 오류가 발생할 수 있다.

그림 5와 그림 6은 Reese 등(1976)이 천공말뚝에 대하여 수행한 재하시험 결과를 보여준다. 말뚝직경은 760mm이고, 근입깊이는 6m로서 모래 및 점토층에 관입되었다. 그림 5는 정재하시험에서 얻어진 하중분포곡선인데, 분포곡선의 형태가 잔류하중의 영향을 무시할 때 나타날 수 있는 S자형 형태를 보여준다. 그림 6은 단위주면마찰력 곡선인데 깊이에 따라 단위주면마찰력이 증가하다가 감소하므로 한계깊이가 존재하는 것처럼 보여진다. 이러한 결과 역시 잔류하중의 영향을 무시하여 나타나는 것으로 판단된다. 잔류하중은 항타말뚝 뿐만 아니라 천공말뚝에도 존재할 수 있으므로 하중전이 재하시험을 수행할 경우에는 반드시 잔류하중의 영향을 분석할 필요가 있다.



(a) 잔류하중을 고려하지 않은 경우



(b) 잔류하중을 고려한 경우

그림 8. 잔류하중의 고려여부에 따른 단위주면마찰력 비교 (Altaee 등, 1993)

3. 현장재하시험 사례분석

한계깊이 개념의 존재여부를 검증하기 위해 Altaee 등(1993)의 재하시험과 동아대학교의 재하시험 사례를 분석하였다. Altaee 등의 재하시험은 균질한 사질토 지반에서 수행되었고, 동아대학교의 재하시험은 점성토와 사질토 혼합지반에서 수행되었다. 본 재하시험의 잔류하중은 말뚝 설치직후부터 재하시험 직전까지 주의깊게 계측하여 분석에 이용하였다.

1) Altaee 등(1993)의 재하시험 사례

Altaee 등(1993)은 균질한 사질토 지반에 직경 285mm의 정사각형 콘크리트 말뚝을 설치한 후 하중전이 정재하시험을 수행하였다. 말뚝관입깊이는

11m와 15m의 두 가지로 변화시켰다. 그림 7은 15m 길이 말뚝의 참지지력(True resistance), 거짓지지력(False resistance), 그리고 잔류하중(Residual load) 분포를 보여준다. 앞서 기술하였듯이 거짓지지력은 말뚝재하시험 전 하중분포를 0으로 초기화시킨 후 측정된 하중분포로서 잔류하중이 고려되지 않았다.

그림 8은 잔류하중을 고려하지 않은 경우(그림 8(a))와 고려한 경우(그림 8(b))의 단위주면마찰력 분포곡선이다. 잔류하중을 고려하지 않은 경우 약 20D (~5.7m 깊이)에서 단위주면마찰력이 최대가 되어 한계깊이가 존재하는 것과 같은 결과를 보여준다. 그러나, 잔류하중을 고려한 경우에는 단위주면마찰력이 깊이에 따라 계속적으로 증가하는 결과를 보여주고 있다. 즉, 사질토 지반에 근입된 말뚝의 지지력 산정시 한계깊이가 존재하지 않는 것을 알 수 있다.

말뚝 지지력 산정에 이용되는 한계깊이 개념에 대한 고찰

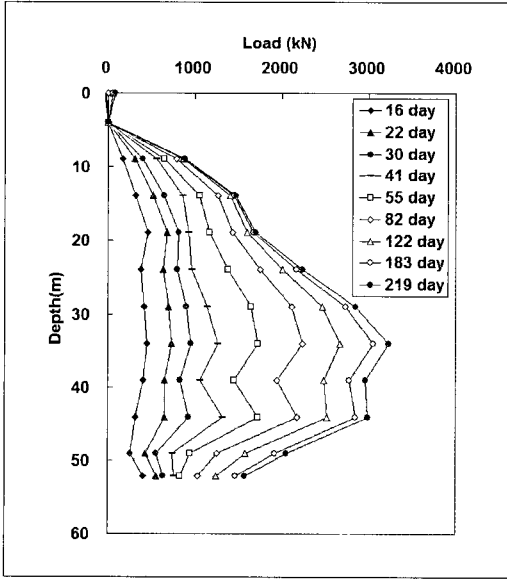


그림 9. 시간경과에 따른 말뚝 잔류하중 측정결과

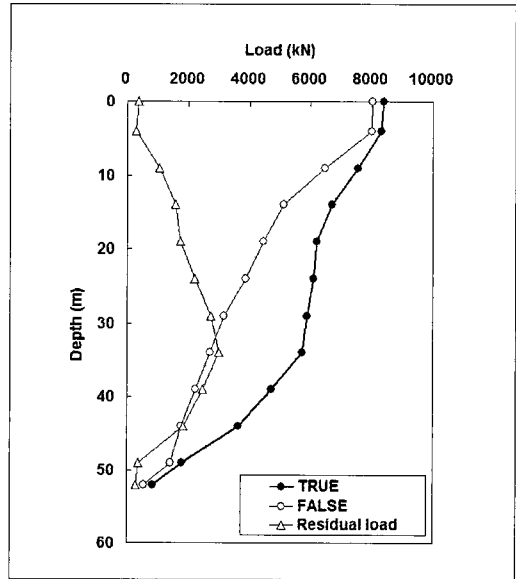


그림 10. PHC 말뚝의 잔류하중과 재하시험의 축하중 분포 곡선

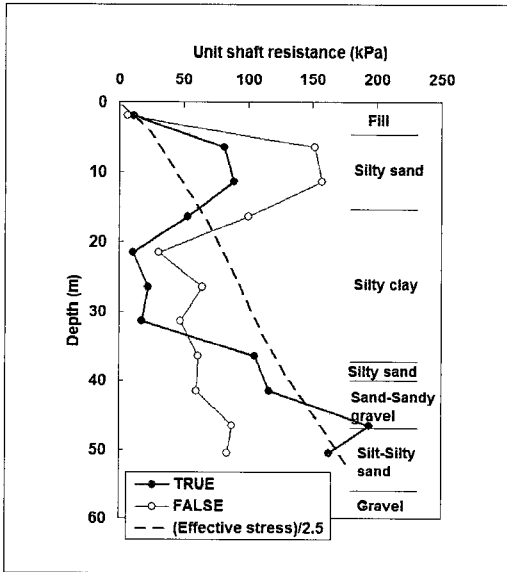


그림 11. 잔류하중의 고려여부에 따른 단위주면마찰력 비교

2) 동아대학교의 재하시험 사례

본 사례는 부산 낙동강 하구 대심도 연약지반에

설치된 PHC 말뚝의 재하시험 사례이다. 말뚝은 직경 600mm의 PHC B종이며 56m의 깊이까지 항타 관입되었다. 본 재하시험은 장대말뚝의 극한지지력을 측정하기 위해 양방향 재하시험과 일반 말뚝두부 정재하시험을 결합하여 수행하였다. 먼저, 말뚝선단에 설치한 O-cell을 이용하여 양방향 재하시험을 수행함으로써 말뚝선단지지력을 제거하였다. 이후 말뚝두부에 하중을 가하여 주면마찰력을 측정하였기 때문에 참주면마찰력(True shaft resistance)을 측정할 수 있었다.

그림 9는 말뚝 설치 후 약 200일간 측정된 잔류하중 분포를 보여준다. 최대잔류하중은 약 34 m깊이에서 3,200 kN 정도로 나타났다.

그림 10은 말뚝두부 재하시험에서 얻어진 축하중 분포곡선이다. 본 시험은 양방향재하시험을 먼저 수행하여 말뚝선단지지력을 제거한 이후에 수행되었으므로 말뚝 주면마찰력의 극한값을 확인할 수 있었다.

극한 주면마찰력은 약 8,400 kN으로 확인되었다.

그림 11은 그림 10의 결과로부터 얻어진 단위주면마찰력 분포이다. 잔류하중 영향을 무시한 'FALSE' 곡선의 단위주면마찰력은 약 12m 깊이(말뚝직경의 20배)에서 최대값에 도달한 후 점차 감소하였고 약 20m 아래 깊이에서는 점성토와 사질토층의 구분 없이 일정한 것으로 나타났다. 그러나, 잔류하중 영향을 고려한 'TRUE' 곡선의 경우 단위주면마찰력이 지표면 근처 사질토에서는 점차 증가하고, 점성토에서 감소하였다가, 약 38m 아래의 사질토층에서 다시 증가하는 등 합리적인 결과를 보여준다. 본 결과로부터 혼합토층의 경우에도 한계깊이가 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 제언

본 기술기사는 사질토 지반에 근입된 말뚝의 지지력 산정에 이용되는 한계깊이 개념의 제언배경을 살펴보고 재하시험 사례분석을 통하여 그 오류를 고찰하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론 및 제언사항은 다음과 같다.

1) 한계깊이 개념은 재하시험 전 말뚝체 내에 존재하는 잔류하중의 영향을 고려하지 않았기 때문에 제안된 것으로 판단된다. 잔류하중의 영향을 고려하여 현장재하시험 결과를 분석하였을 때 한계깊이는 존재하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 균질한 사질토 지반 그리고 점성토와 사질토의 혼합지반 등과 같은 지층구성에 관계없이 한계깊이가 존재하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

2) 잔류하중은 항타말뚝과 천공말뚝, 지반종류 등에 관계없이 발생할 수 있다. 재하시험시 잔류하중의 영향을 고려하지 못하면 정밀한 하중전이 재하시험을 수행하더라도 선단지지력과 주면마찰력의 크기 그리고 단위주면마찰력 분포를 잘못 산정하는 오류가 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다.

3) 한계깊이 개념을 적용하면 말뚝지지력이 과소 평가되어 국가 경제적으로 큰 손실이 발생할 수 있다. 또한, 기초공학 강의서적 및 일부 시방기준에 한계깊이 개념이 기술되어 있어 설계 실무자들에게 큰 혼란을 발생시키고 있으므로 이에 대한 개념정립이 시급한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한토목학회(2001), 도로교설계기준 해설 하부구조편
2. 한국도로교통협회(2005), 도로교설계기준
3. 한국지반공학회(2002), 지반공학시리즈 4 깊은기초
4. 한국지반공학회(2003), 구조물 기초설계기준 해설
5. 일본건축학회(2001), 건축기초구조설계지침
6. AASHTO (2007), LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units, 4th Edition
7. Altaee A., Evgin E. and Fellenius B.H.(1993), "Load transfer for piles in sand and the critical depth", Canadian Geotechnical Journal, 30(3), 455-463.
8. Canadian Geotechnical Society(2006), Canadian Foundation Engineering Manual, 4th Edition
9. Fellenius, B.H. and Altaee A.A.(1995), "Critical

말뚝 지지력 산정에 이용되는 한계깊이 개념에 대한 고찰

- depth: how it came into being and why it does not exist", Proc., Institution of Civil Engineers, J. Geotech. Eng., 113, 107-111.
10. Kulhawy, F.H.(1996), "Discussion on Critical depth: how it came into being and why it does not exist", Proc., Institution of Civil Engineers, J. Geotech. Eng., 119, 244-245.
 11. Meyerhof G.G.(1975), "Bearing capacity and settlement of pile foundations", The 11th Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Division, American Society of Civil Engineering, 102, GT3, 195-228.
 12. NAVFAC(1986), Foundations and Earth Structures
 13. US Army Corps of Engineers(1991), Design of Pile Foundations
 14. Vesic A.S.(1964), "Investigation of bearing capacity of piles in sand", Proc. of N. Am. Conf. on Deep Foundations, Mexico City
 15. Vesic A.S.(1970), "Tests on instrumented piles, Ogeechee River site" J. Soil Mec. Foundation Engineering Div. American Society of Civil Engineering, 96, SM2, 561-584.
 16. Vesic A.S.(1977), "Design of pile foundations", National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, Synthesis of Highway Practice 42.

한국지반공학회 논문집 정기구독 신청 안내

회원 여러분의 안위를 기원합니다.

1999년 1월부터 우리학회의 간행물이 학회지와 논문집으로 분리 발간되었습니다. 학회지는 매월 무료로 회원들께 배포되며, 논문집은 유가로 1년에 20,000원의 구독료를 납부하고 받아 보실 수 있습니다. 필요하신 회원은 다음 사항을 참고하셔서 논문집 구독 신청을 하시기 바랍니다.

다 음

- 구 독 료 : 1년 12회, 20,000원
- 신청기한 : 수시(단, 신청시점이 구독료 납부 회계시점임)
- 입 금 처 : 국민은행 (예금주: 한국지반공학회) 534637-01-002333
- * 입금 후 반드시 학회 사무국(02-3474-4428, 7865)으로 연락하여 확인하시기 바랍니다.