

대심도 연약지반에 근입된 PHC말뚝기초의 하중전이특성 및 극한지지력 산정 Load Transfer Characteristics and Ultimate Bearing Capacity of PHC Pile in Deep Soft Clay Layer

이용화[†] · 김명학¹⁾

Lee, Yonghwa · Kim, Myunghak

ABSTRACT : In this study, the analysis of load transition of PHC pile was performed with the static load test, which was driven in deep soft clay layer of MyungJi site in the western area of Pusan. The results of test showed that the range of unit side resistance of pile in sand layer were 7.4 t/m² to 23.3 t/m² and 6.4 t/m² in the soft clay layer, while the unit base resistance was 955 t/m² in dense silty sand layer. To select the most reasonable static bearing capacity formular, the field measured values are compared with the calculated ones from the suggested various formular. In the case of side resistance in sand layer, the suggest formular in the Structural Foundation Design Manual by KGS was most reasonable, while in clay layer Railroad Design Manual.

Keywords : PHC pile, Load transfer, Soft clay layer, Pile foundation

요 지 : 본 연구에서는 대심도 연약지반에서 PHC말뚝을 향타관입한 후 일정기간 이후 정재하시험을 통한 하중전이분석을 실시하였다. 하중전이분석에서 단위주면마찰력은 상부의 사질토에서 7.4t/m², 심도 14m에서 33m의 점성토구간에서는 6.4t/m², 말뚝선단부가 근입된 사질토에서는 23.3t/m²이 발휘되었으며, 단위선단지지력은 955t/m²으로 실측되었다. 전이된 단위주면마찰력과 국내외에서 알려져 있는 정역학적 지지력산정식과의 비교를 해본 결과 토층별로 가장 적합한 공식을 선정한다면, 사질토의 단위주면마찰력의 경우 한국지반공학회의 구조물기초설계기준 및 해설이, 점성토의 단위주면마찰력의 경우 철도청의 철도설계기준이 가장 실측치에 근접한 값을 나타내었다.

주요어 : PHC 말뚝, 하중전이, 연약지반, 말뚝기초

1. 서 론

부산광역시 서부산권 일대에는 우리나라에서 가장 긴 낙동강이 흐르는 하구에 위치하고 있으며, 이 하천의 중심을 따라 오랜 과거에 발생된 국내 최대의 양산 단층대와 70m를 초과하는 두터운 연약 퇴적층이 폭넓게 분포하고 있다. 최근 녹산산업단지의 개발을 시작으로 다수의 공업단지가 개발되었거나 현재 시공 중에 있다. 그러나 연약점토층의 영향으로 말뚝기초설계에 최대 70m까지 시공함에 따라 많은 공사비의 부담이 있어왔다. 말뚝기초를 설계함에 있어서 가장 중요한 것은 설계지지력의 결정이다. 설계지지력에 따라 구조물의 안전과 전체 공사비에 미치는 영향이 지대하기 때문이다.

말뚝기초의 지지력을 결정하는 방법에는 각종 공식을 이용한 설계법과 현장에서의 재하시험에서 도출된 하중전이분석법 등이 있다. 그중 가장 신뢰할 수 있는 방법은 하

중전이를 포함한 정재하시험이다. 그러나 현장타설말뚝이나 강관말뚝에 대한 실험사례에 비해 PHC말뚝은 변형률계의 부착의 어려움으로 하중전이 시험을 수행한 사례가 아주 희귀하다. 국내에서는 EOID(초기동재하)를 실시한 후 재향타에 의해 실트질 지반에서의 PHC말뚝의 지지력 증가에 대한 연구가 진행된 적이 있다(여병철 등, 2003). 그러나 국내 점성토에서의 향타말뚝, SIP의 연직지지력 산정 시 국내 일부 향타말뚝 설계기준의 경우 일본도로교시방서를 참고하는 일부 국내향타말뚝 설계기준으로 지지력 산정 시 과대 산정되는 경향이 발견되었다(김원철 등, 2004). 이에 국내 연약지반상에서의 적절한 지지력 산정식을 선정하고, 하중전이특성을 알기 위해 공장제작단계에서 변형률계를 PHC내부에 설치하였으며, 급속재하법에 의하여 최대 재하하중 10,000kN으로 재하시험을 실행하였다(김성렬 등, 2006).

본 연구에서는 국내외에서 도입된 PHC말뚝의 정역학적

† 정회원, 인제대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : yonghwa64@naver.com)

1) 정회원, 인제대학교 토목공학과 교수, 인제공학원장

극한지지력 산정식을 비교 검토하여, 정역학적 지지력공식과 현장에서 실시된 정재하실험의 하중전이분석을 통해 연약지반에서의 PHC말뚝설계 시 적절한 지지력공식을 제안하고자 한다.

2. 지반조건

실험이 수행된 곳은 그림 1에서와 같이 상부에서부터 실트질 모래층(0~14m), 연약점토층(14~33m), 조밀한 중간모래층(33~41m), 점토층(41~43m), 모래층(43~57m) 그리고 모래자갈층(57m이하)으로 구성되어있다. 심도 14m에서 33m까지의 연약점토층의 비배수전단강도 값은 평균 $5.3t/m^2$ 으로 측정되었으며, 33~41m에 존재하는 중간모래층은 SPT의 N값이 47~50으로 매우 조밀한 것이 특징이다. 실험 대상말뚝은 외경 600mm 내경 360mm의 B형타입의 PHC말뚝이며 16톤 유압해머에 의해 항타 시공되었다(김성렬 등, 2006).

3. PHC말뚝극한지지력 산정법

3.1 항타공법으로 시공된 경우 지지력 산정식

3.1.1 구조물기초설계기준 및 해설(한국지반공학회, 2003)

항타말뚝의 단위선단지지력은 다음의 표 1과 같이 산정할 수 있다.

항타말뚝에 작용하는 단위주면마찰력은 지반종류에 따

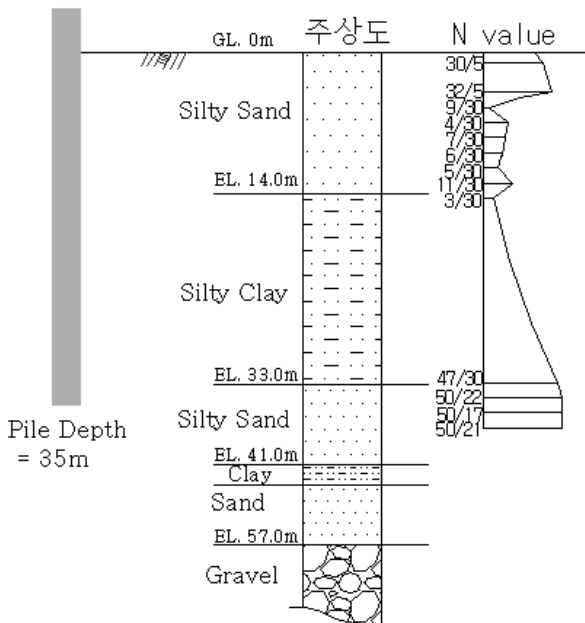


그림 1. 실험현장의 지층구분도

라 표 2에서처럼 제안한다.

3.1.2 철도설계기준(철도청, 1999)

항타말뚝의 단위선단지지력은 다음의 표 3과 같이 산정할 수 있다.

항타말뚝에 작용하는 단위주면마찰력은 지반종류에 따라 표 4에서처럼 제안한다.

3.1.3 항만시설물설계기준서(해운항만청청, 1993)

항타말뚝의 단위선단지지력은 다음의 표 5와 같이 산정할 수 있다.

항타말뚝의 단위주면마찰력은 다음의 표 6과 같이 산정할 수 있다.

3.2 매입공법으로 시공된 경우 지지력 산정식

매입공법은 일명 속과기공법으로 불리우며 말뚝의 속빈부분을 이용하여 말뚝 선단부 지층을 굴착하고 배토하면

표 1. 단위선단지지력 산정식(구조물기초설계기준 및 해설, 2003)

시공법 지반의 종류	단위선단지지력(t/m^2)
사질토	$\sigma'_v N_q$
점성토	$Su N_c$ ($\phi u=0$, Su : 점토비배수 전단강도) $\sigma'_v N_q + c N_c$ (c 와 ϕ 를 고려한 경우)

표 2. 단위주면마찰력 산정식(구조물기초설계기준 및 해설, 2003)

시공법 지반의 종류	단위주면마찰력(t/m^2)
사질토	$Kspv \tan \delta$
점성토	α 계수법, β 계수법

표 3. 단위선단지지력 산정식(철도설계기준, 1999)

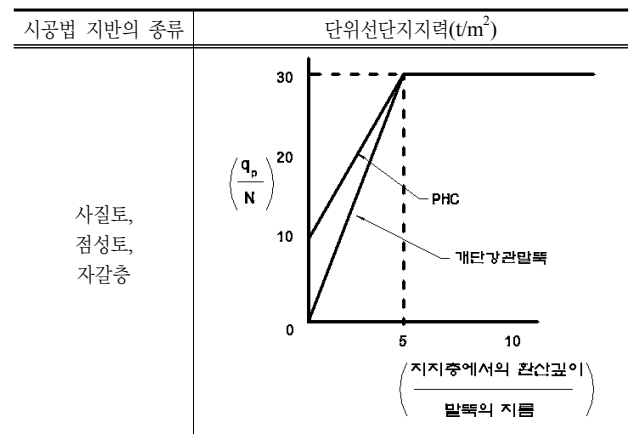


표 4. 단위주면마찰력 산정식(철도설계기준, 1999)

시공법 지반의 종류	단위주면마찰력(t/m^2)
사질토	$0.2N$ (≤ 10)
점성토	c^* (c^* 는 점성토의 전단강도) 또는 N (≤ 15)

표 5. 단위선단지지력 산정식(항만시설물설계기준서, 1993)

시공법 지반의 종류	단위선단지지력(t/m^2)
사질토	30N
점성토	$9c_p$ (c_p 는 말뚝 선단에서의 점착력)

표 6. 단위주면마찰력 산정식(항만시설물설계기준서, 1993)

시공법 지반의 종류	단위주면마찰력(t/m^2)
사질토	$0.2N'$
점성토	c_a (c_a 는 말뚝 근입전장에 대한 평균부착력)

서 말뚝을 침설하는 공법을 말하며, 이공법의 최종과정에서는 소요의 지지력을 확보하기 위하여 타격을 하거나 시멘트 밀크를 말뚝 선단부에 주입한다. 최근에 각광받고 있는 기성말뚝으로 PHC말뚝이 있는데, 다양한 지지력산정식을 가진 현장타설말뚝과는 달리 매입말뚝인 PHC말뚝의 정역학적 지지력 산정식은 3가지로 국내외에 적용되고 있다.

3.2.1 도로교설계기준 및 해설-하부구조편(대한토목학회, 2001)

매입말뚝 공법에 의한 PHC의 선단처리방법은 다음과 같이 크게 3가지 방법으로 구분되며, 각 방법별 단위선단 지지력 산정방법은 표 7과 같다.

- 최종타격방법
- 시멘트밀크분출교반방법(사질토)
- 콘크리트타설방법

매입말뚝에 작용하는 단위주면마찰력은 지반종류에 따라 표 8에서처럼 제안한다.

3.2.2 건축기초구조설계지침(일본건축학회, 2004)

매입말뚝의 단위선단지지력은 건축물기초일 경우 다음의 표 9와 같이 산정할 수 있다.

매입말뚝의 단위주면마찰력은 건축물기초일 경우 다음의 표 10과 같이 산정할 수 있다.

3.2.3 기성콘크리트말뚝-기초구조설계메뉴얼(일본콘크리트파일건설기술협회, 2003)

매입말뚝의 단위선단지지력은 시공방법에 따라 최종타격방법, 시멘트밀크분출교반방법, 콘크리트타설방법 등 3가지로 나누어졌으며, 최종타격방법의 경우 항타말뚝공법의 표 3과 같다. 매입말뚝과 프리보링말뚝공법에 대하여 각각 단위주면마찰력 표 11와 같이 산정할 수 있다.

3.3 정재하시험결과와 기존 제안식과의 비교

정재하시험결과 하중-침하량곡선과 축방향 하중전이곡선을 구할 수 있다. 그림 2는 정재하시험에서 얻어진 하중-침하량곡선이다. 재하하중 최대 685ton에 달할 때에 말

표 7. 단위선단지지력 산정식(도로교설계기준 및 해설, 2001)

시공방법	단위선단지지력산정법(t/m^2)
최종타격방법	항타말뚝공법의 산정방법 적용, $q_p=30N$
시멘트밀크 분출교반방법	- 모래층: $q_p=15N(\leq 750)$ - 모래자갈층: $q_p=20N(\leq 1,000)$ 여기서, N: 말뚝선단지반의 N값
콘크리트치기방법	- 모래자갈층 및 모래층 ($N \geq 3$): $q_p=300$ - 단단한 점성토: $q_p=3q_u$ 여기서, N: 표준관입시험 N값 q_u : 점토의 일축압축강도

표 8. 단위주면마찰력(도로교설계기준 및 해설, 2001)

시공법 지반의 종류	단위주면마찰력(t/m^2)
사질토	$0.1N(\leq 5)$
점성토	$0.5S_u$ 또는 $0.5N(\leq 10)$

표 9. 단위선단지지력 산정식(건축기초구조설계지침, 2004)

시공방법	단위선단지지력(t/m^2)	
	사질토	점성토
매입말뚝	$q_p=200N'$ N': 말뚝선단 아래로 1D, 위로 4D사이의 평균 N값(D: 직경)	$q_p=6S_u$ S_u : 점토비배수 전단강도(t/m^2)
상한값 $q_p=1,200t/m^2$		

표 10. 단위주면마찰력 산정식(건축기초구조설계지침, 2004)

시공방법	단위주면마찰력(t/m^2)	
	사질토	점성토
매입말뚝	$q_s=2.5N(N \leq 50)$	$q_s=0.8S_u(S_u \leq 12.5t/m^2)$ S_u : 점토비배수 전단강도(t/m^2)

표 11. 단위주면마찰력 산정식(기성콘크리트말뚝-기초구조설계메뉴얼, 2004)

시공방법	단위주면마찰력(t/m^2)	
	사질토	점성토
매입말뚝	$2N(\leq 10)$	$0.8S_u$ 또는 $8N(\leq 10)$
프리보링말뚝	$5N(\leq 15)$	S_u 또는 $10N(\leq 10)$

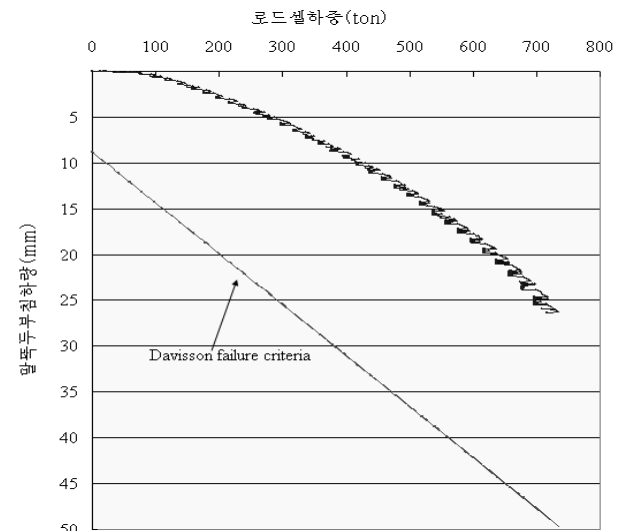


그림 2. 하중-침하량 곡선(김성렬 등, 2006)

뚝두부가 파손되어 실험이 종료될 때까지 하중재하단계는 총 36단계였다. Davission의 항복침하량 기준보다 작으므로 극한지지력은 685ton 보다 큰 것으로 예측할 수 있다.

말뚝의 축방향 하중전이곡선은 그림 3과 같다. 하중전이곡선에서 말뚝의 극한지지력은 선단지지력과 주변마찰 지지력으로 구분 지을 수 있겠다. 말뚝 주변부의 마찰력전이를 파악하기 위해 그림 4와 같이 심도별 단위주면마찰력을 각 토층별로 구분하였다. 지면에서부터 심도 14m까지의 사질토에서의 단위주면마찰력은 $7.4t/m^2$, 심도 33m의 점성토에서는 $6.4t/m^2$, 말뚝선단부가 근입된 심도 35m의 사질토에서는 $23.3t/m^2$ 로 각각 조사되었다.

말뚝주면에서 전이된 단위주면마찰력과 앞서 논의되었던 정역학적 단위주면마찰력과의 비교는 표 12에서 제기하고 있다. 말뚝시공법에 따라 크게 2가지로 나누어(항타

공법, 매입공법) 국내의 정역학적 지지력공식으로 산정해본 결과 항타공법의 경우 말뚝상부의 사질토에서는 정재하실험치와 비교 시 0.2~1.1배의 비율을, 점성토구간에서는 0.8~2.6배의 비율을, 말뚝선단부의 사질토에서는 0.2~0.4배의 비율을 나타내었다. 매입공법의 경우 말뚝상부의 사질토에서는 정재하실험치와 비교 시 0.1~0.2배의 비율을 보였으며, 점성토구간에서는 0.4~0.7배, 말뚝선단부의 사질토에서는 0.2~0.5배로 과소평가됨을 알 수 있었다.

단위면적당 선단지지력의 비교는 표 13에 나타내었다. 전체적으로 2배미만의 비율로 단위주면마찰력보다 근접한 수치를 나타내었으며, 항타말뚝공식에서는 철도설계기준이 정재하실험치의 1.1배로, 매입말뚝공식에서는 일본건축학회의 건축기초구조설계지침이 1.1배로 정재하실험치에 가장 근접하게 산정되었다.

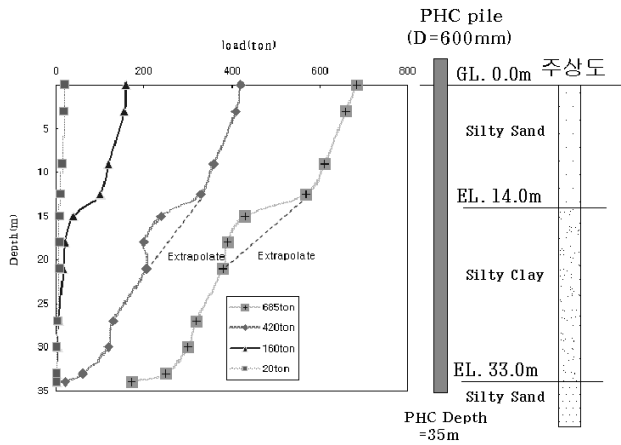


그림 3. 말뚝축하중분포도

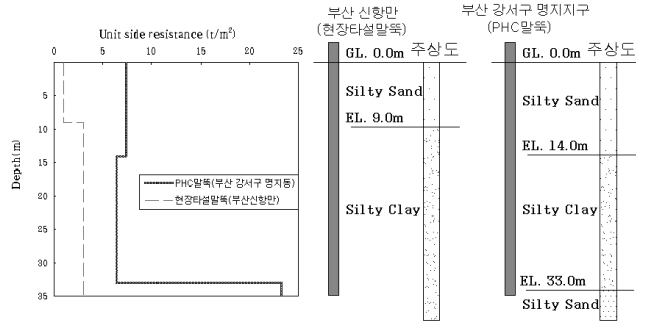


그림 4. 단위주면마찰력비교

표 12. 단위주면마찰력비교

단위: t/m^2

구분		사질토, 심도(0-14m)	점성토, 심도(14-33m)	사질토, 심도(33-35m)
정재하실험치		7.4(1)	6.4(1)	23.3(1)
항타말뚝지지력공식	구조물기초설계기준 및 해설 (한국지반공학회, 2003)	8.2(1.1)	16.5(2.6)	4.8(0.2)
	철도설계기준 (철도청, 1999)	1.2(0.2)	5.3(0.8)	10.0(0.4)
	항만시설물설계기준서 (해운항만청청, 1993)	1.2(0.2)	5.3(0.8)	10(0.4)
매입말뚝지지력공식	도로교설계기준 (대한토목학회, 2001)	0.6(0.1)	2.6(0.4)	5.0(0.2)
	건축기초구조설계지침 (일본건축학회, 2004)	1.5(0.2)	4.2(0.7)	12.5(0.5)
	기성콘크리트말뚝- 기초구조설계매뉴얼 (일본콘크리트파일건설기술협회, 2003)	1.2(0.2)	4.2(0.7)	10.0(0.4)

()안은 정재하실험치와의 비율임.

표 13. 단위선단지지력비교

단위: t/m²

구분		단위선단지지력(t/m ²)
정재하실험측치		955(1)
향타말뚝지지력공식	구조물기초설계기준 및 해설 (한국지반공학회, 2003)	1740(1.8)
	철도설계기준 (철도청, 1999)	1050(1.1)
	항만시설물설계기준서 (해운항만청청, 1993)	1500(1.6)
매입말뚝지지력공식	도로교설계기준 (대한토목학회, 2001)	1500(1.6)
	건축기초구조설계지침 (일본건축학회, 2004)	1000(1.1)
	기성콘크리트말뚝- 기초구조설계매뉴얼 (일본콘크리트파일건설기술협회, 2003)	1000(1.1)

()안은 정재하실험측치와의 비율임.

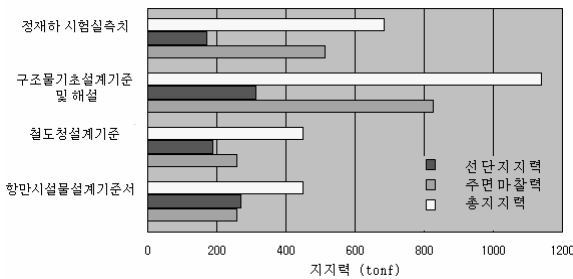


그림 5. 향타공법의 극한지지력 실측치와 예측치

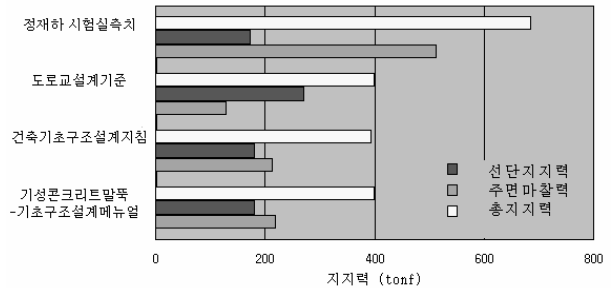


그림 6. 매입공법의 극한지지력 실측치와 예측치

표 14. 정역학적지지력 산정식 비교

단위: tonf

구분		선단지지력	주면마찰력	극한지지력
정재하실험측치		172.0(1)	512.3(1)	684.3(1)
향타말뚝지지력공식	구조물기초설계기준 및 해설 (한국지반공학회, 2003)	313.2(1.8)	825.4(1.6)	1138.6(1.7)
	철도설계기준 (철도청, 1999)	189.0(0.6)	259.2(0.5)	448.2(0.7)
	항만시설물설계기준서 (해운항만청청, 1993)	270(1.6)	259.2(0.5)	529.2(0.8)
매입말뚝지지력공식	도로교설계기준 (대한토목학회, 2001)	270.0(1.6)	129.5(0.3)	399.5(0.6)
	건축기초구조설계지침 (일본건축학회, 2004)	180.0(1.1)	213.3(0.4)	393.3(0.6)
	기성콘크리트말뚝- 기초구조설계매뉴얼 (일본콘크리트파일건설기술협회, 2003)	180.0(1.1)	219.8(0.4)	399.8(0.6)

()안은 정재하실험측치와의 오차율임.

말뚝의 총극한지지력은 극한일 때의 선단지지력과 주면 마찰력을 더해야 한다(도로교설계기준해설, 2001). 단위주면 마찰력과 선단지지력에서 말뚝의 주면장과 순단면적을 적용하면 총 극한지지력은 표 14와 같다. 이때 말뚝의 순단면적은 PHC말뚝의 외경(600mm)에서 내경(360mm)을 뺀 말

뚝의 선단부 면적이다. 총 극한지지력은 향타공법의 경우 선단지지력은 정재하실험측치와 비교시 0.6~1.8배의 비율을, 주면마찰력은 0.5~1.6배의 비율을, 매입말뚝의 경우 선단 지지력은 1.1~1.6배의 비율을, 주면마찰력은 0.3~0.4배의 비율을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 대심도연약지반에서 실시한 PHC말뚝의 정재하실험에 대한 실측치와 정역학적지지력산정식과의 지지력 값을 비교 검토하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 토층별 하중전이특성을 분석하고자 말뚝의 단위주면마찰력을 토층별로 나타내었다. 지면에서부터 심도 14m까지의 사질토에서의 단위주면마찰력은 $7.4t/m^2$, 심도 33m의 점성토에서는 $6.4t/m^2$, 심도 35m의 사질토에서는 $23.3t/m^2$ 로 각각 조사되었다.
- (2) 전이된 단위주면마찰력과 항타말뚝공법의 정역학적 단위주면마찰력을 비교해본 결과, 말뚝상부의 사질토에서는 정재하실측치 대비 0.2~1.1배의 비율을 보였으며, 점성토구간에서는 0.8~2.6배, 말뚝선단부의 사질토에서는 0.2~0.4배의 비율을 나타내었다. 단위선단지지력의 경우 정재하실측치 보다 약 1~1.8배의 비율로 산정되었다.
- (3) 전이된 단위주면마찰력과 매입말뚝공법의 정역학적 단위주면마찰력을 비교해보니, 말뚝상부의 사질토에서는 정재하실측치와 비교 시 0.1~0.2배의 비율을 보였으며, 점성토구간에서는 0.4~0.7의 비율을, 말뚝선단부의 사질토에서는 0.2~0.5배의 비율을 나타내었다.
- (4) 일본에서 제안된 건축기초구조설계지침과 기성콘크리트말뚝-기초구조설계메뉴얼은 선단지지력과 주면마찰력이 유사하게 예측치를 보였으며, 정재하실측치와 비교 시 선단지지력은 1.1배로 거의 유사하였으며, 주면마찰력의 경우 약 0.3~0.6배의 실측치대비 비율을 보였다.
- (5) 항타말뚝공법의 총극한지지력의 경우 구조물기초설계 기준 및 해설은 1.7배 실측값보다 크게 산정되었으며, 항만시설물설계기준서가 0.8배로 가장 근접하게 산정되었다. 매입말뚝공법의 정역학적지지력산정식의 경우

주면마찰력이 모두 정재하 실측치보다 0.3~0.5배로 적게 산정되었으며 잔류하중과 부마찰력을 고려한다면 예측치에서 더 낮아질 것이므로, 앞으로 더 많은 현장 재하시험 데이터의 축적을 통해 주면마찰력의 정역학적 지지력산정식의 계수의 변동이 필요할 것으로 보인다.

- (6) 시공법에 따른 지지력산정법에 상관없이 토층별로 가장 적합한 공식을 선정한다면, 사질토의 단위주면마찰력의 경우 한국지반공학회의 구조물기초설계기준 및 해설이, 점성토의 단위주면마찰력의 경우 철도청의 철도설계기준이 가장 실측치에 근접한 값을 나타내었다. PHC말뚝의 경우 기성말뚝인 관계로 이전까지는 현장 타설말뚝과 달리 하중전이분석이 거의 이루어지지 않았다. 앞으로 더 많은 하중전이분석을 포함한 정재하 시험이 이루어진다면 실측값에 근접한 정역학적지지력산정식을 산정할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 김성렬, 정성교(2006), PHC말뚝의 하중전이실험을 통한 참지지력의 산정, *한국지반공학회논문집*, Vol. 22, No. 11, pp. 113~122.
2. 김원철, 양진석(2004), 강관말뚝-SIP(PHC말뚝)비교, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 5, No. 4, pp. 21~32.
3. 대한토목학회(2001), *도로교설계기준 해설*, 대한토목학회, pp. 207~309.
4. 일본도로협회(1992), *항기초시공편람*.
5. 일본지반공학회(2004), *항기초의 조사, 설계, 시공에서 검사까지*.
6. 일본콘크리트파일건설기술협회(2003), *기제콘크리트항의 시공관리*.
7. 여병철, 오세욱, 배우석, 안병철(2003), 실트지반에 타입된 말뚝의 지지력 증가효과, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 4, No. 3, pp. 19~26.
8. 철도청(1999), *철도설계기준(철도교편)*, 철도청, pp. 556~620.
9. 한국지반공학회(2002), *깊은기초*, 도서출판 구미서관, pp. 221~265.
10. 한국지반공학회(2006), *PHC말뚝의 설계 및 시공요령*, 한국지반공학회, pp. 7~100.
11. 해운항만청(1993), *항만시설물 설계기준서(상권)*, 해운항만청, pp. 379~456.

(접수일: 2007. 11. 23 심사일: 2007. 11. 26 심사완료일: 2007. 12. 18)