

시멘트밀크 배합비에 따른 다양한 지반 내 SDA매입말뚝의 연직지지력

Bearing Capacity of SDA Augered Piles in Various Grounds Depending on Water-Cement Ratio of Cement Milk

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

이 재 호² Lee, Jae-Ho

채 수 근³ Chai, Soo-Geun

Abstract

The standard construction manual of the SDA (Separated Doughnut Auger) piling method was proposed so that the resisting capacity of the augered piles could work effectively. 438 dynamic pile load tests were performed on 379 test piles, which were installed at 36 sites in Korea by the SDA piling method with application of various water-cement ratio of cement milks. The dynamic pile load test results showed that the bearing capacity of the SDA augered piles depended on the water-cement ratio of cement milks. And couple of the formulas were presented according to water-cement ratio and various grounds to estimate quantitatively both the unit end bearing and the unit frictional capacity of the SDA augered piles. It was also considered that the water-cement ratio of cement milks exerts an influence on the bearing capacity of the SDA augered piles. The presented formulas were compared with the existing formulas, which were presented by several standard design codes to design the augered piles.

요 지

본 연구에서는 SDA(Separated Doughnut Auger)매입말뚝의 지지성능이 잘 발휘될 수 있는 표준시공법에 대한 매뉴얼을 정리하여 제시하였다. 또한 전국 36개 현장에서 여러 가지 시멘트밀크 배합비를 사용하여 SDA매입공법으로 시공한 379본의 시험말뚝에 대하여 438회의 동재하시험을 시행하였다. 동재하시험결과 SDA매입말뚝의 지지력은 시멘트밀크의 배합비에 영향을 받음을 알 수 있었으며, 단위선단지지력과 단위마찰지지력을 시멘트밀크의 배합비와 지반종류별로 정량적으로 계산할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 시멘트밀크 배합비가 SDA매입말뚝의 지지력에 미치는 영향을 검토하였고 이들 제안식을 기존의 표준시방서에 제시되어 매입말뚝설계에 적용되는 기존의 식들과 비교 고찰하였다.

Keywords : Augered pile, Cement milk, End bearing capacity, EOID, Frictional capacity, N-value, Pile load test, Restrike, Water-cement ratio

1. 서 론

현재 국내에서는 기성말뚝을 주로 매입말뚝공법으로

시공하고 있다. 그러나 매입말뚝의 시공법과 지지력산정방법은 타입말뚝과 달리 지지력을 좌우하는 요소가 다양하여 아직 표준화되지 못하고 있는 실정이다. 다만

1 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ.)

2 정회원, 중앙대학교 대학원 박사졸업, 공학박사 (Member, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ.)

3 정회원, 중앙대학교 대학원 박사졸업, 공학박사 (Member, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ., csg@gsenc.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

SIP공법(두성건설, 1987)을 대상으로 정량적인 지지력 추정방법에 대한 연구가 몇몇 기관 및 대학에서 진행된 바 있다. 이원제(2000), 임해식 외(2001), 이송 외(2002), 김정수(2003) 및 서영화 외(2003) 등은 매입말뚝에 대한 현장 시험결과를 통계적으로 분석하여 지지력 산정식을 제안하거나 지지력 특성을 연구하였다. 또한 도로교설계기준 해설(대한토목학회, 2001), 구조물기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003), 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005) 및 한국도로공사(2006)는 선굴착공법 또는 중굴공법으로 시공하는 말뚝의 지지력 산정식을 제안하였다.

그러나 이들 산정식은 매입말뚝의 시공방법, 지반종류 및 시멘트밀크 배합비 조건 등을 고려하지 않았으며, 일부 지지력 산정식은 외국 문헌과 외국 기준식에 준해서 제안함에 따라 시공방법과 시멘트밀크 배합비가 달라질 경우 지지력이 달라질 수 있다.

채수근(2002), 홍원표 외(2002), Hong & Chai(2003, 2005)는 매입말뚝의 선단지지력과 마찰지지력이 지반종류에 따라 다르게 적용되어야 함을 시험말뚝에 대한 재하시험결과에 의거 제안한 바 있다. 시멘트밀크 배합비 역시 매입말뚝의 지지력에 영향을 미치는 매우 중요한 요소로서 지반종류별로 다르게 적용해야 매입말뚝의 지지력을 증대시킬 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 전국의 36개 현장에서 SDA매입말뚝 시공법으로 설치된 379본의 시험말뚝에 동재하시험을 실시하여 세 가지 시멘트밀크 배합비에 대한 매입말뚝의 선단지지력과 마찰지지력을 지지지반의 종류별로 검토하여 보다 합리적인 지지력 산정식을 제안하고자 한다. 더 나아가 지반종류별로 적합한 시멘트밀크 배합비를 제안하여 매입말뚝공법이 타입말뚝공법보다 비경제적인 기초말뚝시공법이 되지 않도록 설계방안을 마련하는 것이 본 연구의 궁극적인 목적이다.

2. 매입말뚝의 지지력 산정식 검토

2.1 말뚝지지력 산정 일반식

일반적으로 말뚝의 축방향 극한지지력의 산정식은 식 (1)과 같이 표현된다(한국지반공학회, 2003). 이 식에서 단위선단지지력(q_p)과 각 지층의 단위주면마찰력(f_s)을 알게 되면 축방향 극한지지력을 구할 수 있다.

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p A_p + \sum f_s A_s \quad (1)$$

여기서, Q_u : 말뚝의 축방향 극한지지력(tf)

Q_p : 극한선단지지력($= q_p A_p$)

Q_s : 극한마찰지지력($= f_s A_s$)

q_p : 단위선단지지력($mN', tf/m^2$)

m : 선단지지력계수

N' : 말뚝선단부의 N 치

A_p : 말뚝 선단면적(m^2)

f_s : 단위주면마찰력($nN_s, tf/m^2$)

n : 마찰지지력계수

N_s : 말뚝주변지반의 평균 N 치

A_s : 말뚝마찰지지면적(m^2)

2.2 매입말뚝의 지지력 산정식에 대한 고찰

2.2.1 개요

매입말뚝공법은 일본과 한국에서 주로 사용되는 기성말뚝에 대한 시공법이며, 국내에서 사용하고 있는 대부분의 매입말뚝시공법도 일본에서 도입된 경우가 많다. 그러나 천공방식, 시멘트밀크 배합비와 주입방식 및 최종 말뚝설치방법이 일본에서의 공법과 차이가 있으므로 지지력 산정식도 차이가 있어야 할 것이다.

2.2.2 국내 설계기준

표 1에서 보는 바와 같이 구조물기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)에 의하면, 선굴착공법으로 시공된 말뚝의 선단지지력은 지반의 종류와 관계없이 타입말뚝의 선단지지력을 1/3~1/2로 감소시켜 $q_p=10\sim15 N'(\leq 750tf/m^2)$ 인 식을 적용하도록 제안하고 있다. 여기서 N' 는 말뚝선단지반의 N 치이다. 주면마찰력도 지반의 종류와 관계없이 타입말뚝의 마찰지지력을 1/2로 감소시켜 $f_s=0.1N_s(\leq 5.0tf/m^2)$ 인 식을 적용하도록 제안하고 있다. 여기서 N_s 는 말뚝주변지반의 평균 N 치이다. 한편 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서는 사질토에 시공되는 매입말뚝의 단위선단지지력을 $q_p=20N'(\leq 1,200tf/m^2)$ 인 식으로 산정하도록 제안하였으며, 점성토지반에서는 $q_p=6c_u(tf/m^2)$ 를 제안하였다. 여기서, c_u 는 점성토의 비배수전단강도이다. 단위주면마찰력은 시멘트밀크가 충전된 경우 사질토에서는 타입말뚝보다 증가시켜 $f_s=0.25N_s(\leq 12.5tf/m^2)$ 로 제안하였으며, 점성토지반에서는 $f_s=0.8c_u(\leq 10tf/m^2)$ 를 제안하였다. 그리고 이들 식에 대한 안전율은 모두 3을 적용하고 있다.

그러나 이와 같은 기존의 매입말뚝 지지력 산정식에

표 1. 선굴착공법 및 매입공법으로 시공된 말뚝의 지지력 산정식

설계기준	지지력	극한선단지지력(tf)	극한마찰지지력(tf)	안전율
구조물기초 설계기준 해설 (선굴착공법)		$Q_p = mN'A_p(\text{tf})$ $mN' \leq 30 \times 50 = 1500\text{tf/m}^2$ (타입공법) $mN' \leq 10 \sim 15 \times 50 = 500 \sim 750\text{tf/m}^2$ $m \leq 30 \times 1/3 \sim 1/2 = 10 \sim 15$ (선굴착공법)	$Q_s = nN_s A_s(\text{tf})$ $nN_s \leq 0.2 \times 50 = 10\text{tf/m}^2$ (타입공법) $nN_s \leq 0.1 \times 50 = 5\text{tf/m}^2$ (선굴착공법) $n = 0.2 \times 1/2 = 0.1$	3
건축기초구조 설계기준 (매입공법)		$q_p = 20N' (\leq 1200\text{tf/m}^2)$: 사질토 $q_p = 6c_u$: 점성토	$f_s = 0.25N_s (\leq 12.5\text{tf/m}^2)$: 사질토 $f_s = 0.8c_u (\leq 10\text{tf/m}^2)$: 점성토	3

Q_p : 극한선단지지력(= $q_p A_p$)
 q_p : 단위선단지지력(mN' , tf/m^2)
 N' : 말뚝선단부의 N치
 N_s : 말뚝주변부의 평균 N치
 c_u : 점성토의 비배수 전단강도(tf/m^2)
 m : 선단지지력계수

Q_s : 극한마찰지지력(= $f_s A_s$)
 f_s : 단위주면마찰력(nN_s , tf/m^2)
 A_p : 말뚝 선단면적(m^2)
 A_s : 말뚝 마찰지지면적(m^2)
 q_u : 점성토의 일축압축강도(tf/m^2)
 n : 마찰지지력계수

표 2. 매입말뚝의 지지력 산정식(COPITA, 2006)

시공법	산정식	지지력 산정식	공법명	안전율
선굴착 최종타격공법		$Q_u = \alpha N' A_p + (\beta N_s L_s + \gamma q_u L_c) \psi$ (kN) $N_s \leq 25, q_u \leq 100\text{kN/m}^2, \alpha = 300, \beta = 2, \gamma = 0.5$	KSD공법	3
선굴착 최종경타공법		$Q_u = \alpha N' A_p + (9L_c + 24L_s) \psi$ (kN) $\alpha = 250 \dots \dots \dots (l \leq 100D)$ $\alpha = 250 - 50 \left(\frac{l/D - 100}{10} \right) \dots \dots (100D < l \leq 110D)$	니딩공법 ALT공법	3
선굴착 근고(根固)공법		$Q_u = \alpha N' A_p + (\beta N_s L_s + \gamma q_u L_c) \psi$ (kN) $\alpha = 175$ (모래지반, 자갈지반) $\alpha = 166$ (점성토지반) $N' \leq 50, \beta N_s = 4.8N_s + 35 \leq 179\text{kN/m}^2$ $\gamma q_u = 0.4q_u + 15 \leq 95\text{kN/m}^2$	BFK공법 FP-BESTEX공법 (주로 마다가 있는 말뚝을 사용함)	3
선굴착 확대근고공법		$Q_u = \alpha N' A_p + (\beta N_s L_s + \gamma q_u L_c) \psi$ (kN) $\alpha = 250 \dots \dots \dots (l < 90D)$ $\alpha = 250 - 2.5(l/D - 90) \dots \dots (90D < l \leq 110D)$ $\beta = 2, \gamma = 0.5, \beta N_s = 15, \gamma q_u = 15$	RODEX공법 BRB공법 ST-RODEX공법 ATRAS공법 BESTEX공법	3

Q_u : 극한지지력(kN) N' : 말뚝선단부 N치 N_s : 말뚝주변부 평균 N치
 L_s : 사질토층에 관입된 말뚝길이(m) q_u : 점성토 1축압축강도(kN/m²) ψ : 말뚝주면장(m)
 L_c : 점성토층에 관입된 말뚝길이(m) D : 말뚝직경(m) l : 말뚝길이(m)
 α : 선단지지력계수 β : 사질토지반에서 말뚝주면마찰력계수
 A_p : 말뚝선단면적(m²) γ : 점성토지반에서 말뚝주면마찰력계수

는 시멘트밀크 배합비에 따라 달라지는 지지력 특성이 고려되어 있지 않다. 따라서 시멘트밀크 배합비를 임의로 결정하여 지반종류에 무관하게 동일한 시멘트밀크 배합비로 시공하는 국내 실정을 감안해 볼 때 매입말뚝의 지지력은 현장마다 크게 달라져서 이들 산정식에 의한 산정치와 다르게 된다.

2.2.3 일본 설계기준

일본에서 사용되는 매입말뚝의 지지력 산정식은 표 2.2.2 기준과 유사하며, N값과 연계하여 이용하고 있으며

표 2에서 보는 바와 같이 공법에 따라 상이한 기준식을 적용하고 있다(COPITA, 일본 콘크리트말뚝 건설기술 협회, 2006). 일본에서 사용하는 매입말뚝시공법은 표 2에서 보는 바와 같이 선굴착최종타격공법, 선굴착최종경타공법, 선굴착근고공법 및 선굴착확대근고공법의 네 가지가 있다(채수근, 2007; 홍원표·채수근, 2007a, 2007b).

이들 공법은 다년간 시행한 시험시공과 말뚝재하시험 결과로 지지력 특성이 규명되었으며 시공관리체계가 잘 확립되어 있다. 또한 일본 건설성으로부터 품질에 대한 철저한 심사를 받아 인정된 공법이므로 현장 적용

시 별도의 시험시공과 재하시험을 시행하지 않고 직접 적용하고 있다. 표 2에 제시된 안전율 3은 상시하중 작용시의 안전율이다.

그러나 이들 공법은 시멘트밀크 배합비와 주입방식에 있어서 현재 국내에서 적용하고 있는 매입말뚝공법과 크게 다르다. 국내에서는 말뚝 주변과 선단부에 동일한 배합비의 시멘트밀크를 사용하고 있지만, 일본에서는 대부분 선단부에서는 부배합(W/C=60~70%)으로 하고, 주변부에서는 선단부와 동일한 배합비 또는 빈배합의 시멘트밀크를 주입하고 있다(일본 콘크리트말뚝 건설기술협회, 1994). 천공방식도 국내에서는 배토방식을 채택하고 있지만 일본의 공법은 비배토방식, 즉 교반날개를 사용하여 시멘트밀크와 토사를 교반시킨다. 최종 설치방법에서도 국내에서는 주로 경타방식을 채택하는 반면에 일본에서는 대부분 회전압입방식으로 말뚝을 설치하고 말뚝의 선단부도 천공심도까지 설치하지 않고 일정 길이만큼 띄워서 설치하고 있다. 따라서 일본에서 사용하는 지지력 산정식을 사용할 경우 지지력이 달라질 수 있다.

3. 시험시공 개요

3.1 SDA매입말뚝 시공법

SDA매입말뚝공법은 상호 역(逆) 회전하는 오거스크류와 케이싱스크류로 동시에 지반을 천공하고 말뚝을 삽입한 후 압입, 회전압입 또는 경타(輕打) 방식으로 최종 설치 시공하는 공법이다. 케이싱스크류와 연속날개를 가진 오거스크류로 천공함에 따라 굴착효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 양호한 연직도(鉛直度)로 말뚝을 시공할 수 있다. 또한 케이싱스크류를 사용하기 때문에 지하수위가 높은 모래·자갈 퇴적층이나 연약한 점성토 지반에서도 공벽을 유지할 수 있으며 지반 교란을 방지할 수 있다.

굴착된 토사나 압편을 육안으로 관찰할 수 있으므로 각 지층의 확인은 물론이고 말뚝 지지층도 용이하게 결정할 수 있는 장점이 있다. 그리고 말뚝 삽입 전후에 말뚝의 선단부와 주변부에 두 번으로 나누어 시멘트밀크를 충분히 주입함으로써 큰 지지력을 확보할 수 있다.

SDA매입말뚝공법의 표준시공방법, 각 단계별 품질 관리 내용, 시공순서도 및 시공장비에 대하여는 채수근(1997, 2000a, 2007), 홍원표·채수근(2007a, 2007b)의 논

문에 상세히 설명되어 있다.

3.2 현장

SDA매입말뚝의 지지력 특성을 분석하기 위해 표 3에서와 같이 전국 36개 현장에서 실시한 시험시공 자료를 이용하였다. 지역별로 구분해 보면 서울 6개 현장, 경기·인천 14개 현장, 충청도 3개 현장, 전라도 6개 현장, 부산과 경상도 5개 현장 및 강원도 2개 현장 등이다.

3.3 말뚝규격 및 시공조건

시험말뚝으로 고강도 콘크리트말뚝(PHC, Pretensioned spun High strength Concrete, KS F 4306)과 강관말뚝(SKK400, KS F 4602)을 사용하였다. 그러나 본 연구에는 PHC말뚝으로 시험한 자료를 주로 사용하였으며, 직경 400mm말뚝은 17개 현장에서, 직경 450mm말뚝은 2개 현장에서, 직경 500mm말뚝은 16개 현장에서 각각 이용되었다. 그리고 강관말뚝은 1개 현장에서만 사용되었다. 말뚝길이는 개략 4.6~33.9m 정도가 사용되었다. 매입말뚝 시공법에는 재료비가 상대적으로 저렴한 고강도콘크리트말뚝이 주로 사용되었으며, 앞으로도 이와 같은 추세는 지속될 것으로 예상된다. 사용되는 말뚝의 직경도 구조물과 건축물의 규모가 점점 증가함에 따라 커지고 있다. 모든 현장의 말뚝은 SDA매입말뚝의 표준시공법에 따라 시공하였으며, 최종 말뚝 설치방법으로는 압입방식 혹은 드롭해머를 사용하는 경타방식을 적용하였다.

3.4 시멘트밀크 배합비

일본으로부터 SIP공법이 1987년 도입되면서 물시멘트비(W/C)가 83%인 시멘트밀크가 주로 사용되었다(대한주택공사, 1997). 표 3에서 보는바와 같이 물시멘트비가 83%인 시멘트밀크는 1.0m³를 만드는데 시멘트 880kg과 물 730kg이 필요하다. 왜냐하면 시멘트의 비중이 3.15가 되므로 이를 체적으로 환산하면 880÷3.15=280ℓ가 되며 물 730ℓ와 더하면 1,010ℓ 즉, 약 1m³의 체적이 되기 때문이다. 그러나 이와 같은 빈배합비를 갖는 시멘트밀크는 너무 묽어서 투수성이 큰 사질토지반에서는 여러 번 주입하더라도 말뚝 주변지반으로 빠져나가 충전이 되지 않으며, 지하수가 많은 경우에는 희석되어 더욱 빈

배합이 되어 지지력이 작아지게 된다. 이에 따라 투수성이 큰 지반이나 지하수가 많은 현장에서는 부배합으로 변경하여 사용하고 있다(채수근, 2000b, 2002, 2004, 2005; Hong & Chai 2003, 2005).

따라서 83%의 물시멘트비인 시멘트밀크보다 부배합의 배합비를 사용하는 것이 바람직하다. 사용된 배합비 중 현장기술자나 기능공이 기억하기 쉬운 배합비인 68%의 물시멘트비를 제안하여 많은 현장에 유용하게 적용하였다(표 4에 제시된 현장 참조). 68%인 물시멘트비의 시멘트밀크에는 시멘트 1,000kg 대 물 680kg이 소요된다. 이와 같은 배합비는 풍화토나 풍화암반에서는 매우 효과적인 배합비로 사용되고 있다.

그러나 투수성이 큰 사질지반에서는 말뚝주변부를 충진 하는데 많은 양의 시멘트밀크와 시간이 소요된다. 따라서 많은 현장에서 시멘트밀크 주입을 소홀히 하는 대신 경타방식 위주로 시공하고 있어 지지력 저하는 물론이고 말뚝이 손상되는 사례가 많이 있다. 더욱이 말뚝의 수평지지력이 매우 중요한 설계요소인 고속철도현장에서는 더욱 부배합의 시멘트밀크를 충진하는 것이 요구되었다(채수근, 2000b). 이러한 현장에서는 50%인 물시멘트비의 시멘트밀크 사용을 시도하여 보았지만 주입호스가 파열되어 주입이 곤란하게 됨에 따라 59%의 물시멘트비를 사용하였다. 59%인 물시멘트비의 시멘트밀크에는 시멘트 1,100kg 대 물 650kg이 소요된다. 표 4의 인천 운서현장(1, 2)은 말뚝의 선단부와 주변부가 점성토층에 지지되는 조건이었으며 당초 계획된 68%의 물시멘트비인 시멘트밀크로는 설계지지력이 작아 59%의 물시멘트비로 변경하여 경제적인 기초말뚝공사를 할 수 있었다. 이와 같은 두 현장에서 경험한 바와 같이 지하수가 많거나 투수성이 큰 사질토지반과 연약한 점성토지반에서는 59%인 배합비의 시멘트밀크를 적용하는 것이 설계효율을 높일 수 있다는 것이 많은 현장에서 확인되었다(표 4에 제시된 현장 참조).

한편 국내 현장에선 말뚝의 선단부와 주변부에 동일한 배합비의 시멘트밀크를 적용하고 있다. 배합비를 다르게 하면 품질관리가 용이하지 않을 뿐만 아니라 말뚝 시공속도가 현저히 떨어질 수 있기 때문이다. 일본에서도 과거와 달리 최근에는 말뚝의 선단부와 주변부에 동일한 배합비를 사용하는 추세이다(일본 콘크리트말뚝 건설기술협회, 1994). 따라서 본 연구에서도 선단부와 주변부에 동일한 배합비의 시멘트밀크를 주입하여 시공한 말뚝의 자료를 이용하여 지지력 특성을 분석한다.

표 3. 시멘트밀크 표준 배합비(m³)

배합비(W/C, %)	시멘트(kg)	물(ℓ)	비 고
59	1,100	650	말뚝 주변 및 선단부에 동일한 배합비를 적용함
68	1,000	680	
83	880	730	

현장별로 사용한 시멘트밀크의 배합비는 표 3과 같다.

3.5 지반조건 및 표준관입시험의 N치

지반조건으로는 점성토지반(C, M), 사질토지반(SG), 풍화토지반(RS), 풍화암반(WR) 및 연암반 등 다섯 종류로 구분하고 이들 지반에 시공된 SDA매입말뚝의 자료를 수집하였다. 점성토지반(C, M)과 사질토지반(SG)은 통일분류법에 근거하여 구분하였으며, 풍화토지반과 풍화암반 및 연암반은 서울시 표준지반분류기준(서울특별시, 1996)에 따라 구분하였다.

표준관입시험은 KS F 2307(한국표준협회, 2002)에 규정된 방법에 따라 15cm의 예비타와 15, 15cm의 본타로 나누어 연속성 있게 실시되었으며 N치는 본타의 값으로 하였다. N치의 보정은 상재압에 의한 보정, Rod 길이에 의한 보정 및 Hammer 효율에 의한 보정 등을 실시하나 해머의 낙하효율이 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으므로 연구논문(이명환 외, 1992)결과에 따라 에너지효율 보정치를 고려한 것으로 국제 표준값(N₆₀)과 비교하여 연구된 효율 0.86~0.89의 값을 곱해 설계 N치로 하였다. 본 연구에 적용한 말뚝 주변지반에서의 표준관입시험치(N_s)는 마찰지지력을 고려하는 각 층의 평균 N치를 사용하였다.

4. SDA매입말뚝의 지지력 분석

4.1 재하시험 개요

시험시공된 379본의 시험말뚝 중 340본을 대상으로 총 438회 동재하시험(EOID 273회, Restrike 165회)을 실시하였다. 이와 같은 말뚝의 시공방법 및 시험방법에 대한 상세한 내용은 표 4 및 표 5와 같다. 시험시공한 말뚝에 대해 PDA(Pile Driving Analysis : Pile Dynamics Inc, 1995)에 의한 초기동재하시험(EOID, End Of Initial Driving)을 ASTM D 4945 규정 및 KS F 2591에 따라 실시하고 Case 분석과 CAPWAP(CAse Pile Wave Analysis Program : GRL Associates Inc, 1996) 분석을 실시하여

표 4. 현장별 말뚝규격, 시공조건 및 지반조건

Site No.	지반조건		말뚝 규격 및 시공조건				현장 위치
	말뚝선단지반*	말뚝주면지반**	규격	W/C [†]	관입깊이(m)	FIM [‡]	
1	ML(2), CL(2)	C, M	∅500 PHC	59, 68	27.8~29.2	압입	인천 운서(1)
2	CL(2)	C, M	∅500 PHC	59	27.3~28.5	압입	인천 운서(2)
3	SG(5), WR(1)	M, S, SG, WR	∅400 PHC	68	10.1~13.4	경타	충주 철금
4	SG(4)	SG	∅400 PHC	83	13.8~14.0	경타	서울 목동
5	GP(4), WR(1)	C, G, SM, WR	∅500 PHC	59	17.8~21.0	경타	부산 엄궁
6	RS(1), WR(1)	RS, WR	∅500 PHC	83	6.0~14.8	경타	광주 풍암(1)
7	RS(1), SR(1)	G	∅500 PHC	59	25.0~25.7	경타	서울 양평
8	RS(2), WR(1)	RS	∅500 PHC	68	8.8~13.7	경타	광주 풍암(2)
9	RS(3), WR(2)	RS	∅400 PHC	68	18.1~19.3	경타	통영 무전
10	RS(4)	C, G, RS	∅500 PHC	68	23.8~27.2	경타	여수 국동
11	RS(3)	SM, RS	∅400 PHC	68	10.9~14.3	경타	양주 구암
12	RS(6), WR(1), SR(1)	SM, RS	∅400 PHC	68	4.6~14.0	경타	과천 주암
13	RS(1), WR(1)	C, SM, RS	∅400 PHC	59	14.3~17.9	경타	강릉 입암
14	RS(18)	ML, C, RS	∅500 PHC	59	32.4~33.9	경타	인천 향동
15	RS(1), WR(1)	S, C, SM	∅400 PHC	68	12.1~13.2	경타	여수 화치
16	RS(2), WR(5)	M, S, G, RS, WR	∅500 PHC	83	10.8~13.8	경타	광명 일직
17	WR(3)	M, RS	∅400 PHC	68	11.0~12.6	경타	의왕 삼동
18	WR(1), RS(3)	C, RS	∅400 PHC	68	11.7~12.1	경타	천안 성정
19	WR(4), RS(7)	SM, RS	∅400 PHC	68	8.5~14.0	경타	서산 동문
20	WR(2)	C, SM, G	∅400 PHC	68	15.0~15.8	경타	서울 가산
21	WR(2), SR(1)	G	∅500 PHC	68	21.5~22.0	경타	서울 잠실
22	WR(1), SR(1)	RS, WR	∅400 PHC	68	7.0~13.8	경타	원주 단계
23	WR(5)	S, RS	∅400 PHC	68	9.0~10.3	경타	인천 논현
24	WR(7)	S, RS, WR	∅400 PHC	68	8.2~12.3	경타	서울 중계
25	WR(14)	M, S, G, RS, WR	∅500 PHC	59	4.7~11.2	경타	오산 부산동
26	SR(3), WR(2)	C, S, G, SG, RS, WR	∅400 PHC	68	9.6~11.1	경타	서울 금천
27	SR(8), WR(7)	SG, RS, WR	∅500 PHC	83	4.9~9.6	경타	안양 박달
28	SR(9), WR(3), SG(4)	C, M, SG, WR	∅450 PHC	68	13.3~23.9	경타	부산 화명
29	WR(3)	G, M	∅450 PHC	68	7.7~13.4	경타	광주 첨단
30	SR(2), RS(1)	C, SM, G	∅500 PHC	59	22.1~25.1	경타	안산 성포
31	SR(84)	C, SM, S	∅500 PHC	59	22.6~23.7	경타	목포 옥암
32	SR(4), RS(1), WR(2)	S, G, C, RS, WR	∅500 PHC	59	12.9~16.6	경타	인천 운서(3)
33	SR(2)	ML, C, RS	∅500 PHC	59	16.0~29.1	경타	부산 우동
34	RS(3)	S, RS	∅400 PHC	83	10.6~10.6	경타	평택 어연
35	RS(1), WR(2)	RS, WR	∅400 PHC	83	11.5~21.0	경타	부산 동래
36	WR(4)	M, S, SM, RS, WR	∅609×12t 강관말뚝	50, 59	21.8~22.6	압입	평택 방축

* CL, ML : 점성토지반, SG : 사질토지반, RS : 풍화토지반, WR : 풍화암반, SR : 연암반

말뚝 지지지반중 괄호 내 수치는 시험말뚝 본수임

** C : 점토층, M : 쉘트층, S : 모래층, G : 자갈층, SG : 사질토층, RS : 풍화토층, WR : 풍화암반

† W/C : 시멘트밀크의 물시멘트 배합비(%) ‡ FIM : 말뚝 최종설치방법(Final Installation Method)

말뚝의 지지력과 건전도 등을 확인하였다. 동재하시험은 말뚝 시공직후 주변마찰저항이 배제된 조건에서 말뚝의 선단지지력 위주로 측정되는 초기동재하시험(EOID)결과와 시공 후 일정시간이 경과되어 주입된 시멘트밀크가 양생된 조건에서 마찰지지력이 측정되는 재항타동

재하시험(Restrike)으로 구분하여 시행하였다.

SDA매입말뚝의 지반종류별 및 시멘트밀크 배합비별 지지력 특성을 분석하기 위해서 점성토층, 사질토층, 풍화토층, 풍화암반 및 연암반 등 다섯 종류의 지층에 세 종류의 배합비의 시멘트밀크로 시공된 말뚝의 재항타

동재하시험 결과를 이용하였다.

지지력은 단위마찰력(Unit frictional resistance)으로 표현하여 말뚝종류나 직경 등의 영향에 따른 절대값의 차이가 배제되도록 하였다. 시험말뚝에 대한 초기동재하시험과 재항타동재하시험 결과는 CAPWAP방법으로

해석하였다. 시험말뚝의 설계지지력, 초기동재하시험시의 선단지지력 비율 및 재항타동재하시험시의 마찰지지력 비율은 표 5와 같다. 한편 경과시간별로 전체지지력에 대한 마찰지지력의 비율은 표 5와 같다.

표 5. 동재하시험결과

Site No.	설계 지지력 (tf/본)	동재하시험 말뚝본수		시험 조건(EOID*)		시험 조건(Restrike**)		
		EOID	Restrike	단위선단 지지력 (tf/m ²)	선단지지력 비율 (%)	경과시간 (day)	주면마찰력 (tf)	마찰지지력 비율 (%)
1	120	4	5	450~477	71~94	7~25	119~234	63~89
2	120	2	4	305~463	81~85	14~25	156~253	62~81
3	60	6	3	994~1683	90~97	6~7	45~114	24~44
4	70	2	2	974~991	83	7~12	64~70	40
5	90	5	1	705~1077	83~99	4	69	30
6	120	2	2	1171~1547	80~94	5	107~298	32~73
7	120	2	2	583~1176	87~98	16	125~178	40~57
8	80	3	2	423~703	82~98	7~12	69~125	33~35
9	70	5	3	710~1103	88~99	13~64	84~112	43~55
10	110	4	3	489~1140	87~100	7~30	151~236	46~81
11	70	3	3	949~1208	78~97	15~16	84~204	44~91
12	60	8	2	856~1568	88~93	13	95~236	49~86
13	70	2	-	1179~1642	86~94	-	-	-
14	90	18	13	566~758	77~98	6~22	54~223	26~79
15	60	3	-	1847~3806	88~97	-	-	-
16	105	7	6	560~1532	91~100	6~75	136~196	47~62
17	70	3	1	1499~1648	82~95	4	32	14
18	70	4	5	488~744	84~95	12~35	109~156	40~57
19	70	11	10	885~1560	74~89	9~12	71~128	36~61
20	60	2	-	533~1802	87~95	-	-	-
21	110	3	3	644~813	61~75	7~10	155~226	46~63
22	70	2	1	1598~1129	79~81	7	100	51
23	110	5	-	1159~1612	88~100	-	-	-
24	70	7	1	1145~1611	84~98	4	146	73
25	110	14	12	803~1472	79~94	11~14	74~215	25~59
26	60	5	4	1842	87~92	5~8	83~130	36~55
27	105	15	18	1205~1508	97~99	2~14	73~260	22~71
28	85	16	14	1081~2043	79~96	5~23	45~119	27~65
29	70	3	2	561~947	89~91	10	97~101	38~55
30	110	3	3	721~855	93~98	4~19	48~168	30~55
31	150	84	16	1617~2427	84~100	6~15	67~142	13~28
32	110	7	1	1076~1468	86~94	28	77	25
33	120	2	1	1317~1520	77~94	5	164	46
34	60	2	2	560~881	98	5	81~95	47~59
35	65	-	4	-	-	9~33	29~191	15~65
36	120	2	2	298~979	86~92	7~8	397~407	86~87

* EOID(End Of Initial Driving) : 초기동재하시험을 의미하며, 본 연구에서는 타격에너지, 항타응력, 말뚝의 건전도 및 선단지지력을 측정할 목적으로 시행한 시험임.

** Restrike : 재항타동재하시험을 의미하며, 말뚝 시공후 일정시간이 경과된 상태에서 시행하는 시험으로써 시간경과에 따른 지지력의 변화와 허용지지력을 구하기 위한 시험임.

4.2 점성토지반에서의 지지력

4.2.1 선단지지력

표 4에 정리된 현장의 시험말뚝 중 점성토지반에 지 지된 매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와의 상관성을 분석한 결과는 그림 1과 같다. 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의 단위 선단지지력은 말뚝 지지지반의 표준관입시험치와 10~20 N' 범위로 나타났으며 전체평균치는 15 N' 가 되었다.

또한 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력 (q_p)은 시공 직후 305~477 tf/m^2 이나 시간경과에 따라 시멘트밀크가 양생되어 마찰력이 증가되고 단위선단지 지력은 작게 측정되었다. 일정시간 경과 후에는 말뚝 선 단부의 슬라임과 시멘트밀크의 교반강도가 증가하면서 단위선단지지력이 300~550 tf/m^2 범위로 나타났다. 그러나 이와같은 결과는 모두 N' 치가 40 이하인 지반에 말뚝이 선단지지된 결과이므로 현장에서 적용할 수 있는 최대 단위선단지지력으로는 N' 값이 40인 지반에 대응하는 600(=15×40) tf/m^2 를 선단지지력의 최대치로 제 안한다.

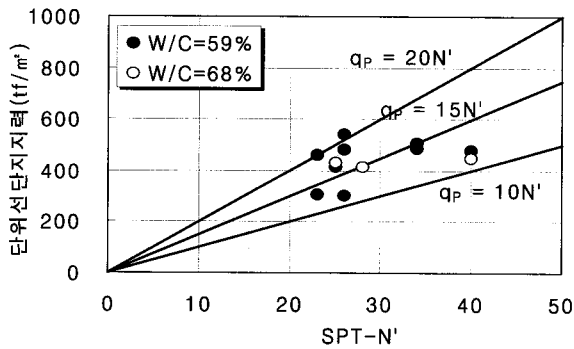
이 제안식은 구조물기초설계기준해설(한국지반공학 회, 2003)에 제시된 $q_p=15N'(\leq 750tf/m^2)$ 과 동일하다. 또 한 표 2에 제시된 일본의 선굴착최종경타공법 보다는 작지만, 선굴착근고공법과는 유사한 것으로 나타났다.

4.2.2 주변마찰력

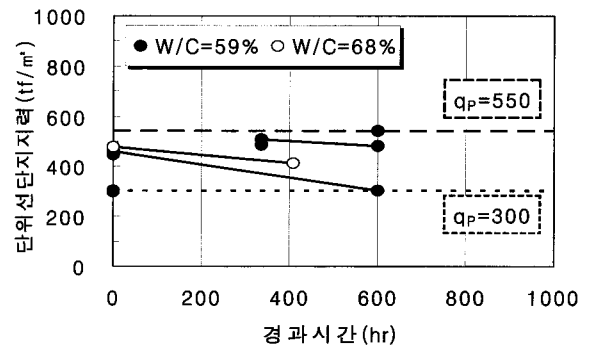
표 4에서 정리된 현장의 시험말뚝 중 점성토지반에 시공된 말뚝 주변지반의 표준관입시험치(N_s)와 단위주 면마찰력(f_s)과의 상관성을 분석한 결과는 그림 2 및 그 림 3과 같다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 물시멘트 배합비(W/C)가 59%인 시멘트밀크를 사용하면, 말뚝의 단위주면마찰력(f_s)은 표준관입시험치 N_s 와 0.1~0.80 N_s 범위로 나타났으며 전체평균치는 0.27 N_s 가 되었다.

물시멘트 배합비(W/C)가 68%인 시멘트밀크를 사용 한 경우는 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 단위주면마찰 력 산정식으로 $f_s=0.20N_s$ 를 제안한바 있다(홍원표·채수 근, 2007b).

또한 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 시간경과에 따라 시멘트밀크가 양생되어 마찰력이 증가되며 단위주면마 찰력은 최대 18.24 tf/m^2 로 나타났다. 그러나 현장에서

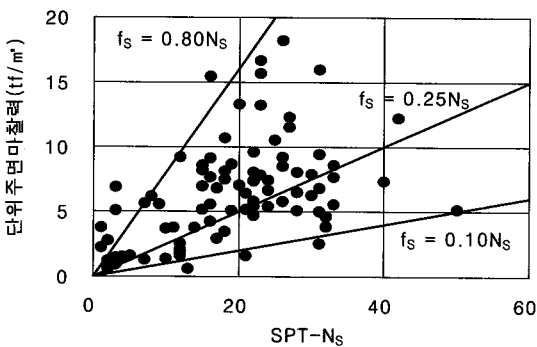


(a) 단위선단지지력과 N' 치와의 관계

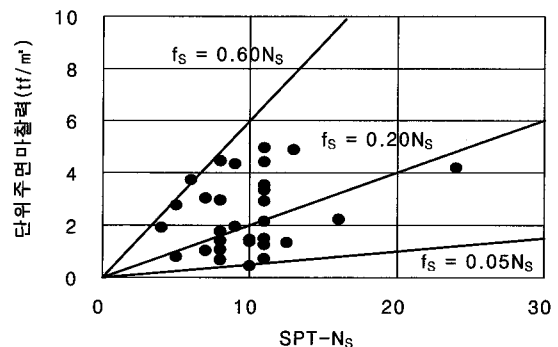


(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

그림 1. 점성토지반에서의 단위선단지지력

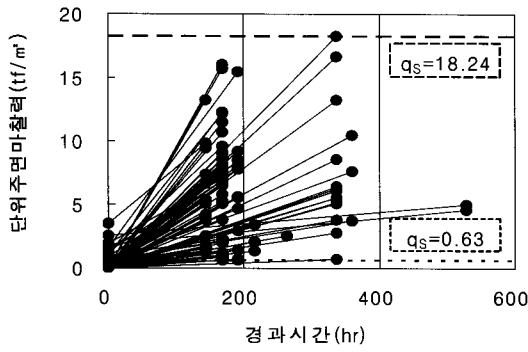


(a) 물시멘트 배합비 59%

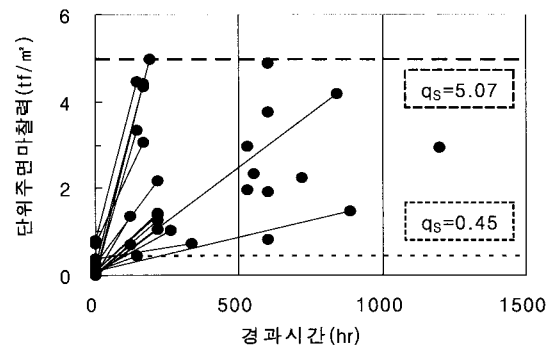


(b) 물시멘트 배합비 68%

그림 2. 점성토지반에서 단위주면마찰력과 N 치의 관계



(a) 물시멘트 배합비 59%



(b) 물시멘트 배합비 68%

그림 3. 점성토지반에서 시간경과에 따른 단위주면마찰력의 변화

적용할 수 있는 최대단위주면마찰력은 10.0tf/m^2 로 제안한다. 이 값은 $f_s=0.25N_s$ 인 식에서 점성토지반의 N_s 값이 40인 경우에 해당한다. 그러나 물시멘트 배합비(W/C)가 68%인 시멘트밀크를 사용하는 경우는 그림 3(b)를 참고로 하여 최대단위주면마찰력을 5.0tf/m^2 으로 제한한 바 있다(홍원표·채수근, 2007b).

4.3 사질토지반에서의 지지력

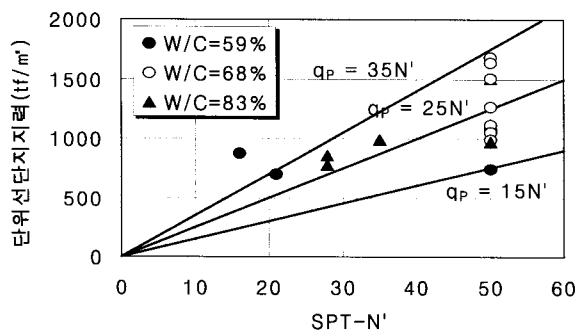
4.3.1 선단지지력

표 4에 정리된 현장의 시험말뚝 중 사질토(S), 모래·자갈퇴적층(SG)지반에 지지된 SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와의 상관성을 분석한 결과는 그림 4와 같다. 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와 $15\sim 35N'$ 범위로 나타났으며 전체평균치는 $25N'$ 가 되었다.

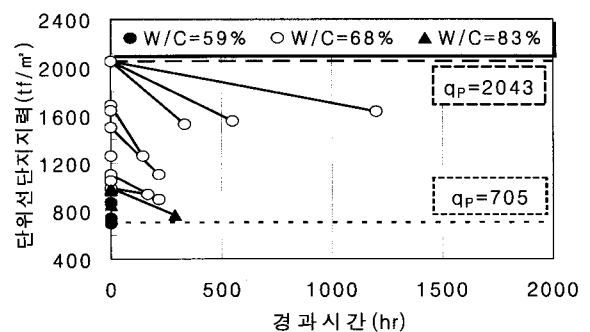
또한 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 $705\sim 2,043\text{tf/m}^2$ 정도가 되는 것으로

측정되었지만 일정시간 경과 후에는 $760\sim 1,629\text{tf/m}^2$ 로 작게 측정되었다. 선단지지력이 감소되는 것으로 측정된 것은 시간경과에 따라 시멘트밀크가 양생되어 마찰력이 증가함에 따라 재항타동재하시험시에 타격에너지가 작아 선단지지력이 충분히 발휘되는 것을 확인하지 못했기 때문에 선단지지력이 과소평가된 것이다. 한편 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 최대 N' 값 50에 대응하는 $1,250(=25\times 50)\text{tf/m}^2$ 를 단위선단지지력의 최대치로 제안한다.

이 제안식은 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2003)에 제시된 산정식 $q_p=15N'(\leq 750\text{tf/m}^2)$ 보다 클 뿐만 아니라, 사질토지반에 대해 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)에 제안된 산정식 $q_p=20N'(\leq 1,200\text{tf/m}^2)$ 보다도 크다. 한편 표 2에 제시된 일본의 선굴착최종경 타공법 또는 선굴착확대근고공법과 동일하지만, 선굴착근고공법보다는 큰 것으로 나타났다. 또한 이 값은 사질토지반에 대해 일본의 도로교시방서에 제시된 $15N'(\leq 750\text{tf/m}^2)$ 보다는 훨씬 큰 편이다(津田, 2003).



(a) 단위선단지지력과 N' 치와의 관계



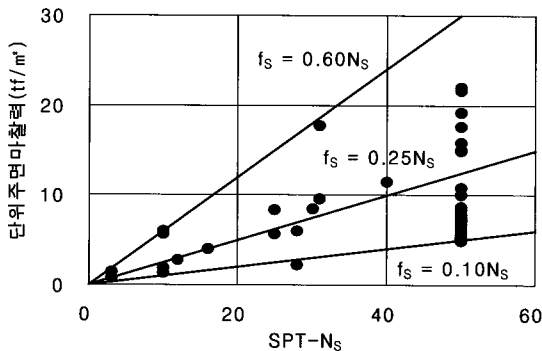
(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

그림 4. 사질토지반에서의 단위선단지지력

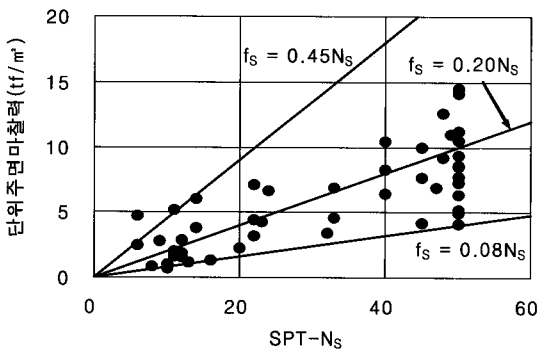
4.3.2 주변마찰력

표 4에서 정리된 현장의 시험말뚝 중 사질토(S), 모래·자갈퇴적층(SG)지반에 시공된 말뚝 주변지반의 표준관입시험치(N_s)와 단위주면마찰력(f_s)과의 상관성을 분석한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 물시멘트 배합비(W/C)가 59%인 시멘트밀크를 사용하면, 말뚝의 단위주면마찰력(f_s)은 표준관입시험치 N_s 와 0.10~0.60 N_s 범위로 나타났으며 평균치는 0.25 N_s 가 되었다. 그러나 현장에서 적용할 수 있는 단위주면마찰력은 최대 N_s 값 50에 대응하는 12.5(=0.25×50)tf/m²를 최대치로 제안한다.

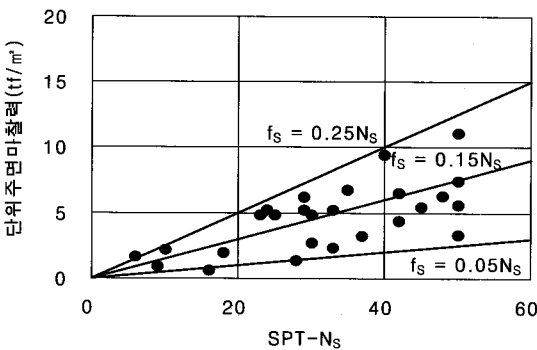
한편 물시멘트 배합비(W/C)가 68%인 시멘트밀크를



(a) 물시멘트 배합비 59%



(b) 물시멘트 배합비 68%



(c) 물시멘트 배합비 83%

그림 5. 사질토지반에서 단위주면마찰력과 N치의 관계

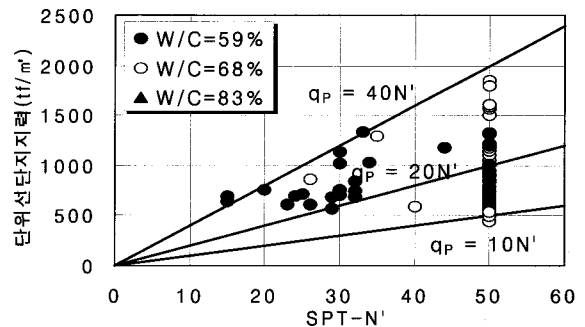
사용하는 경우는 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 단위주면마찰력 산정식으로 $f_s=0.20N_s$ 를 제안한 바 있다(홍원표·채수근, 2007b). 그리고 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 물시멘트 배합비(W/C)가 83%인 시멘트밀크를 사용하는 경우는 단위주면마찰력 산정식으로 $f_s=0.15N_s$ ($\leq 7.5\text{tf/m}^2$)를 적용할 수 있을 것이다.

4.4 풍화토지반에서의 지지력

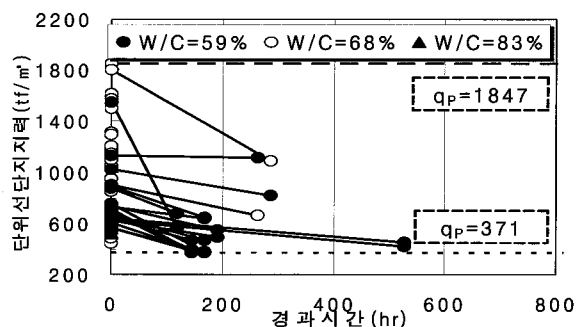
4.4.1 선단지지력

표 4에 정리된 현장의 시험말뚝 중 실트질 모래(SM)로 대표되는 풍화토지반에 지지된 SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')의 상관성을 분석한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와 10~40 N' 범위로 나타났으며 전체평균치는 $q_p=20N'$ 가 되었다.

또한 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 423~1,847tf/m² 정도로 측정되었지만 일정시간 경과 후에는 371~1,192tf/m²로 작게 측정되었다. 이와 같이 선단지지력이 감소하는 것으로 측정



(a) 단위선단지지력과 N'치의 관계



(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

그림 6. 풍화토지반에서의 단위선단지지력

된 것은 시간경과에 따라 시멘트밀크가 양생되어 마찰력이 증가함에 따라 재항타동재하시험시에 타격에너지가 작아 선단지지력이 충분히 발휘되는 것을 확인하지 못했기 때문에 선단지지력이 과소평가된 것으로 생각된다. 따라서 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 최대 N' 값 50에 대응하는 $1,000(=20 \times 50) \text{tf/m}^2$ 를 단위선단지지력의 최대치로 제안한다.

이 제안식은 구조물 기초설계기준해설(한국지반공학회, 2003)에 제시된 산정식 $q_p = 15N' (\leq 750 \text{tf/m}^2)$ 보다는 큰 편이지만, 건축기초 구조설계기준(대한건축학회, 2005)의 제안식 $q_p = 20N' (\leq 1,200 \text{tf/m}^2)$ 과는 같다. 그러나 최대선단지지력은 $1,200 \text{tf/m}^2$ 보다 작다. 또한 이 값은 표 2에 제시된 일본의 선굴착최종경타공법과 선굴착확대근고공법 보다는 작지만, 선굴착근고공법 보다는 큰 것으로 나타났다.

4.4.2 주변마찰력

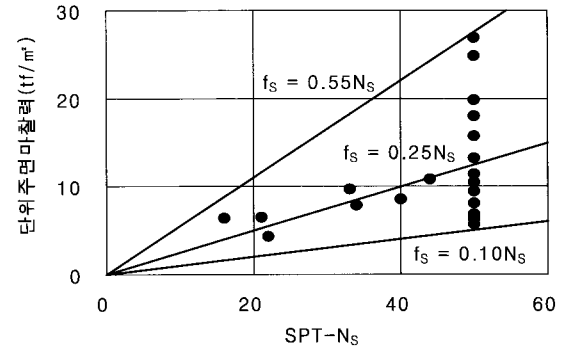
표 4에 정리된 현장의 시험말뚝 중 실트질 모래(SM)가 대표적인 풍화토지반에 시공된 말뚝 주변지반의 표준관입시험치(N_s)와 단위주면마찰력(f_s)과의 상관성을 분석한 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 물시멘트 배합비(W/C)가 59%인 시멘트밀크를 사용하면, 말뚝의 단위주면마찰력(f_s)은 표준관입시험치 N_s 와 $0.10 \sim 0.55N_s$ 범위로 나타났으며 평균치는 $0.25N_s$ 가 되었다. 그러나 현장에서 적용할 수 있는 단위마찰력은 최대 N_s 값 50에 대응하는 $12.5(=0.25 \times 50) \text{tf/m}^2$ 를 최대치로 제안한다.

한편 그림 7(b)에서 보는바와 같이 물시멘트 배합비(W/C)가 68%인 시멘트밀크를 사용하는 경우는 단위주면마찰력 산정식으로 $f_s = 0.20N_s (\leq 10.0 \text{tf/m}^2)$ 를 적용할 수 있을 것이다. 그리고 물시멘트 배합비(W/C)가 83%인 시멘트밀크를 사용하는 경우는 그림 7(c)에서 보는바와 같이 단위주면마찰력 산정식으로 $f_s = 0.15N_s (\leq 7.5 \text{tf/m}^2)$ 를 적용할 수 있을 것이다.

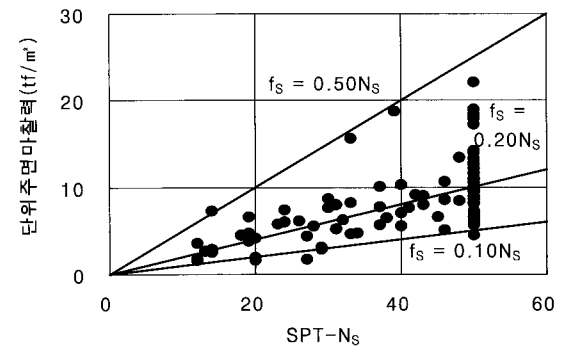
4.5 풍화암반에서의 지지력

4.5.1 선단지지력

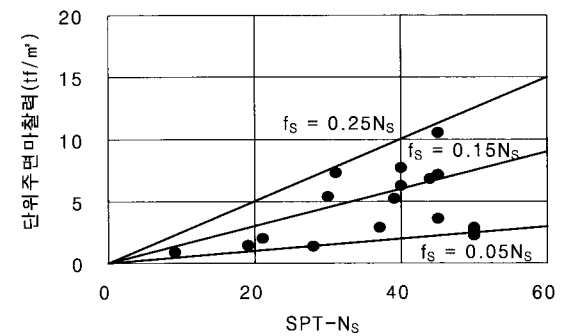
표 4에 정리된 현장의 시험말뚝 중 풍화암반에 지지된 SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와의 상관성을 분석한 결과는 그림 8과 같다. 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의



(a) 물시멘트 배합비 59%



(b) 물시멘트 배합비 68%

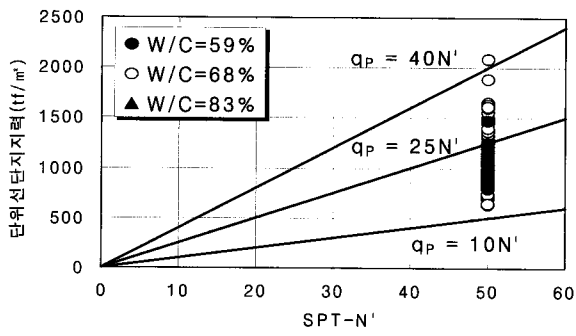


(c) 물시멘트 배합비 83%

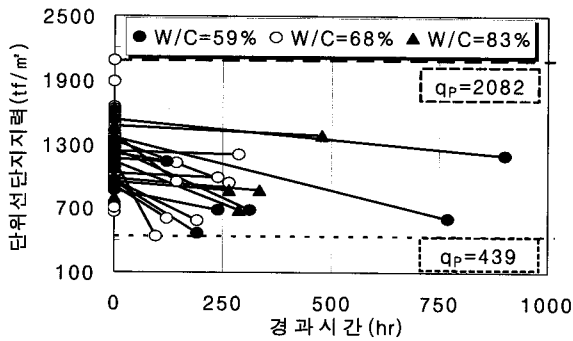
그림 7. 풍화토지반에서 단위주면마찰력과 N 치의 관계

단위선단지지력(q_p)은 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와 $10 \sim 40N'$ 범위로 나타났으며 전체평균치는 $q_p = 25N'$ 가 되었다. 그러나 풍화암반의 풍화정도에 따라 지지력차이가 큰 것으로 확인되었다. 일반적으로 풍화암반의 풍화도가 낮은(D-4) 경우의 말뚝 단위선단지지력은 풍화도가 높은(D-5) 경우보다 크다. 따라서 단위선단지지력 산정식으로 평균치인 $q_p = 25N'$ 를 적용하면, 풍화도가 높은 풍화암반에서는 과대평가할 수 있으며, 풍화도가 낮은 풍화암반에서는 과소평가할 수 있다.

또한 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 $635 \sim 2,082 \text{tf/m}^2$ 에서 일정시간 경과



(a) 단위선단지지력과 N'치와의 관계



(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

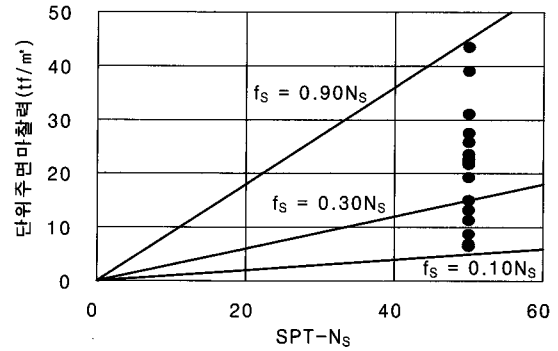
그림 8. 풍화암반에서의 단위선단지지력

후에 439~1,556tf/m² 정도로 작게 측정되었다. 이는 시간경과에 따른 마찰지지력 증가로 인해 단위선단지지력은 시공 직후에 비해 과소평가된 상태이다. 따라서 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 N'값 50에 대응하는 1,250(=25×50)tf/m²를 단위선단지지력의 최대치로 제안한다.

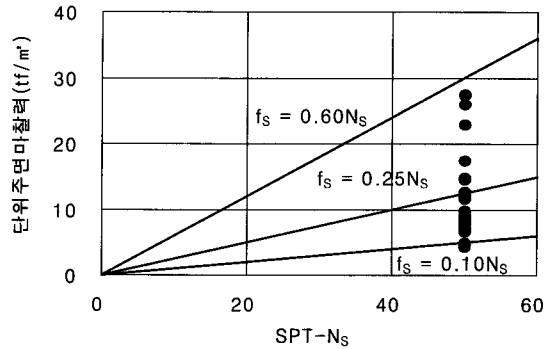
이 제안식은 국내외 규정 중 풍화암반에 시공된 매입말뚝의 지지력 산정식이 없어 직접 비교하기는 곤란하다. 다만 N'치 50이상의 화강풍화대 지반에 최종경타방식으로 시공한 SIP매입말뚝의 선단지지력 산정식으로 김정수(2003)가 제안한 $q_p=20N'$ 보다 큰 것으로 나타났다. 또한 N'치 50이상의 화강풍화대에 경타방식으로 시공한 매입말뚝 중 설계지지력을 만족한 말뚝의 자료만을 이용하여 이원제(2000)가 제안한 $q_p=23.5N'$ 보다도 큰 것으로 나타났다. 그리고 한국도로공사(2006)에서 제안한 $q_p=20N'$ 보다도 큰 것으로 나타났다.

4.5.2 주면마찰력

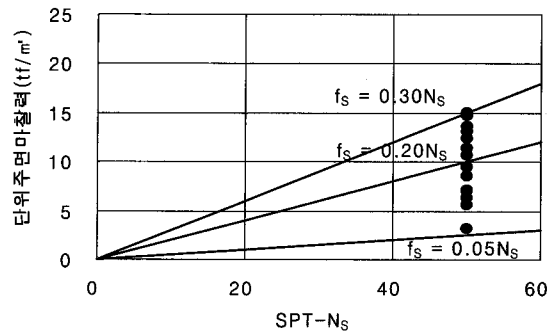
표 4에서 정리된 현장의 시험말뚝 중 풍화암반에 시공된 말뚝 주변지반의 표준관입시험치(N_s)와 단위주면마찰력(f_s)과의 상관성을 분석한 결과는 그림 9와 같다.



(a) 물시멘트 배합비 59%



(b) 물시멘트 배합비 68%



(c) 물시멘트 배합비 83%

그림 9. 풍화암반에서 단위주면마찰력과 N'치의 관계

그림 9(a)에서 보는 바와 같이 물시멘트 배합비(W/C)가 59%인 시멘트밀크를 사용하면, 말뚝의 단위주면마찰력(f_s)은 표준관입시험치 N_s 와 0.10~0.90 N_s 범위로 나타났으며 평균치는 0.36 N_s 가 되었다. 이 중 단위주면마찰력 산정식으로는 $f_s=0.30N_s$ 를 제안한다. 그러나 현장에서 적용할 수 있는 단위주면마찰력은 최대 N_s 값 50에 대응하는 15.0tf/m²를 최대치로 제안한다. 한편 물시멘트 배합비(W/C)가 68%인 시멘트밀크를 사용한 경우는 그림 9(b)에서 보는 바와 같이 단위주면마찰력 산정식으로 $f_s=0.25N_s$ (≤12.5tf/m²)를 제안한 바 있다(홍원표·채수근, 2007b). 그리고 물시멘트 배합비(W/C)가 83%인 시멘트

밀크를 사용하는 경우는 그림 9(c)에서 보는바와 같이 단위주면마찰력 산정식으로 $f_s=0.20N_s(\leq 10.0tf/m^2)$ 를 적용할 수 있을 것이다.

4.6 연암반에서의 지지력

4.6.1 선단지지력

표 4에 정리된 현장의 시험말뚝중 연암반에 지지된 SDA 매입말뚝에 대해 시공직후 동재하시험(EOID)결과와 일정시간 경과 후(Restrike)의 결과는 그림 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 1,063~2,427tf/m²에서 일정시간 경과 후에 721~2,182tf/m² 정도로 작게 측정되었다. 이는 시간경과에 따른 마찰지지력 증가로 인해 단위선단지지력은 시공 직후에 비해 과소평가된 상태임을 보이고 있다. 따라서 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 1,500tf/m²를 최대치로 제안한다.

연암반 역시 풍화암반과 마찬가지로 국내외 규정이 없어 직접 비교하기가 곤란하다. 다만 이 값은 타입말뚝의 선단지지력에 대한 최대 제안치와 동일하며, 기존 연구(채수근, 2002)에서 제시한 단위선단지지력(1,300tf/m²)보다 큰 것으로 나타났다.

4.6.2 마찰지지력

일반적으로 매입말뚝을 최대 연암반에 선단지지시켜 시공하는 경우는 있지만 큰 마찰지지력 확보를 위해 연암반에 충분한 깊이까지 시공하지는 않기 때문에 연암반의 단위주면마찰력 자료를 구하지 못하였다. 따라서 연암반의 단위주면마찰력은 풍화암반과 동일하게 적용하는 것이 안전측이다.

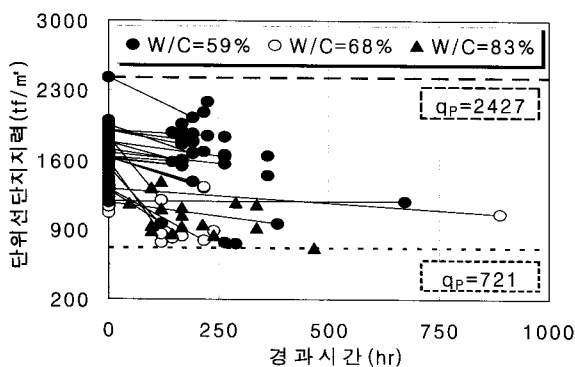


그림 10. 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

5. 시멘트밀크 배합비의 영향

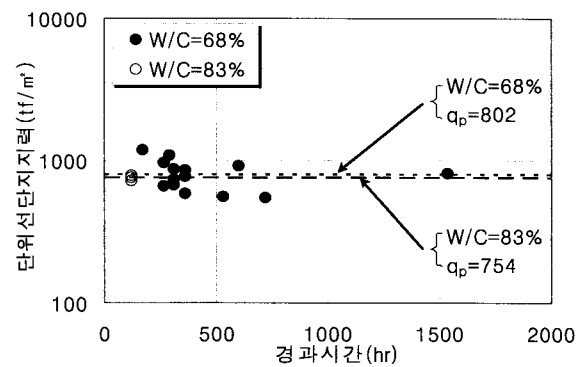
5.1 개요

시멘트밀크 배합비를 변화시켜 선단지지력과 마찰지지력을 측정된 자료를 정리하여 시멘트밀크 배합비가 SDA매입말뚝의 선단지지력과 마찰지지력에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 각 시멘트밀크 배합비별로 제작한 공시체의 강도를 측정하여 배합비에 따른 강도 변화를 확인하였다.

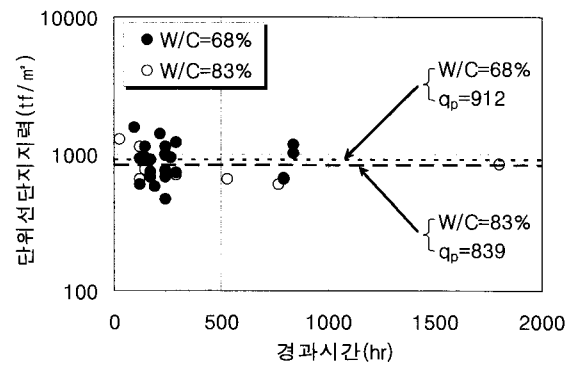
5.2 시멘트밀크 배합비의 영향분석

5.2.1 선단지지력에 미치는 영향 분석

시멘트밀크 배합비가 선단지지력에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 11과 같이 말뚝선단지반이 풍화토층과 풍화암반인 현장에서 시멘트밀크 배합비를 변화시켜 선단지지력을 측정된 자료를 정리하였다. 시험 결과 풍화토지반에서 시멘트밀크의 배합비가 68%와 83%인 경우 평균단위선단지지력은 각각 802tf/m²와 754tf/m²로써 7% 미만정도의 차이밖에 보이지 않았으며, 풍화암반에



(a) 풍화토지반



(b) 풍화암반

그림 11. 시멘트밀크 배합비에 따른 단위선단지지력의 변화

서는 평균단위선단지지력이 912tf/m²와 839tf/m²로써 각각 9% 미만 정도의 차이만을 보였다. 따라서 시멘트밀크 배합비가 매입말뚝의 선단지지력에 미치는 영향은 매우 작은 것으로 확인되었다. 이것은 말뚝을 최종설치하는 방법으로 경타방식을 채택할 경우 말뚝 선단부가 천공바닥의 원지반 내에 관입되기 때문인 것으로 판단된다. 다만 압입방식으로 시공하면 말뚝의 선단부가 원지반에 설치되지 않을 수 있다. 그러나 부배합의 시멘트밀크를 사용하여 슬라임과 충분히 교반하면 경타할 때와 유사한 설계지지력을 얻을 수 있다는 것이 기존 연구(Hong & Chai, 2005)에서 확인되었다. 따라서 경타방식이 아닌 압입방법으로 말뚝을 시공할 때는 부배합의 시멘트밀크를 사용하는 것이 타당하다.

5.2.2 주변마찰력에 미치는 영향 분석

말뚝의 단위주면마찰력(f_s)은 그림 12에서 보는 바와 같이 초기동재하시험(EOID) 때는 말뚝 선단부에서만 약간 측정되었지만 일정 시간이 경과한 후에 실시한 재향타동재하시험(Restrike)에 의하면 말뚝의 주변부에서 크게 증가된 것이 확인되었다. 또한 그림 12(a)~(c)에서 보는바와 같이 동일한 지반조건이라도 시멘트밀크 배

합비에 따라 단위주면마찰력이 달라지는 것으로 확인되었다. 특히 빈배합비보다는 부배합비의 시멘트밀크를 사용할수록 단위주면마찰력이 증가된 것을 볼때 시멘트밀크의 배합비는 매입말뚝의 지지력을 확보하는데 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

5.3 시멘트밀크 배합비별 강도 분석

5.3.1 시험 개요

매입말뚝의 주변마찰력은 말뚝주변에 주입된 시멘트밀크의 배합비에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 이들의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 시멘트밀크의 배합비 및 재령별 일축압축강도시험을 실시하여 시멘트밀크의 압축강도특성을 평가하였다. 본 시험결과를 매입말뚝의 현장재하시험 결과와 비교할 경우 매입말뚝의 주변마찰력을 평가할 수 있을 것이다.

5.3.2 시멘트밀크 공시체 제작, 양생 및 강도시험

시멘트밀크 배합비 및 재령별 강도특성을 알기 위해 시멘트밀크의 물시멘트비(W/C)는 각각 83%, 68% 및 59%가 되도록 배합하고 재령을 3일, 7일, 14일 및 28일

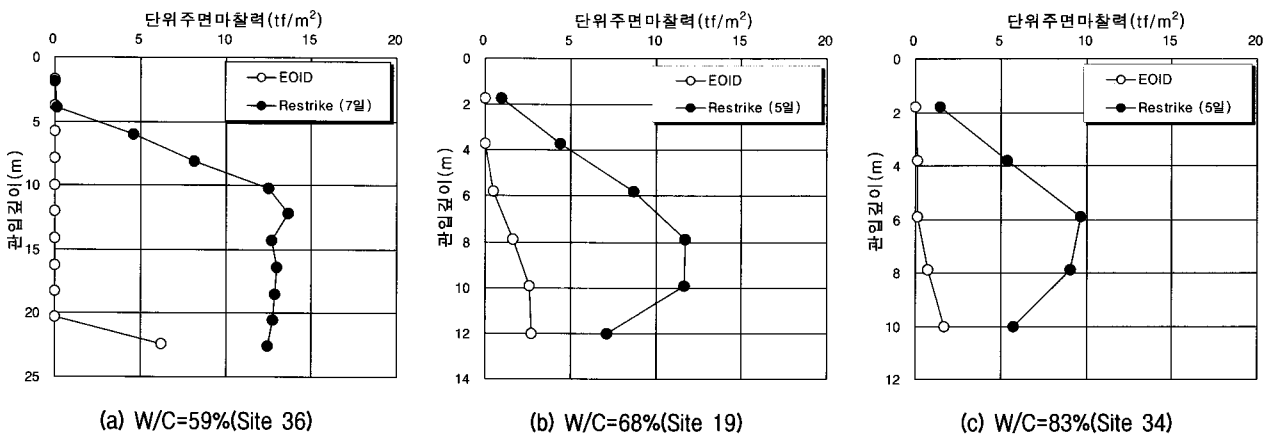


그림 12. 시간경과에 따른 말뚝 관입깊이별 단위주면마찰력의 변화(풍화토지반)

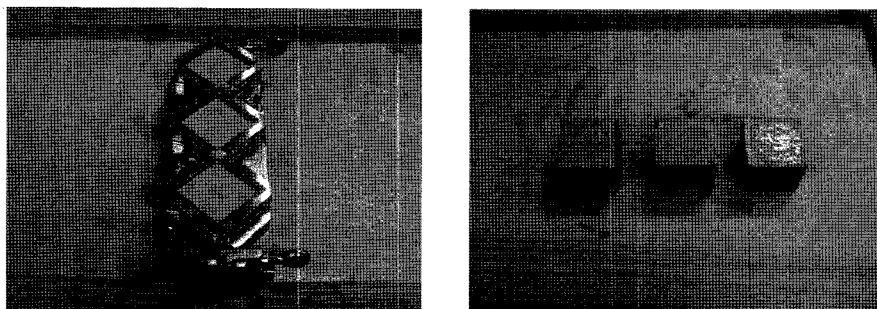


그림 13. 자연건조종인 공시체

로 하여 단면적 25cm^2 인 큐브 공시체를 제작하였다.

5.3.3 강도시험 결과

그림 14에서 보는바와 같이 시멘트밀크의 일축압축 강도는 시멘트밀크의 물시멘트비(W/C)가 83%일 때 재령별로 $47.3\sim 124.1\text{kgf/cm}^2$ 정도로 재령이 증가할수록 압축강도가 증가하였다. 물시멘트비를 68%로 했을 때는 압축강도가 $71.2\sim 246.4\text{kgf/cm}^2$, 물시멘트비를 59%로 했을 때는 $130.4\sim 268.0\text{kgf/cm}^2$ 를 나타내어 물시멘트비가 감소할수록 압축강도가 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타내었다.

그러나 기존 연구(임해식 외, 2001)에 의하면 시멘트밀크가 슬라임과 섞이면 강도가 감소하며 슬라임의 혼합비율이 높을수록 강도감소가 큰 것으로 나타났다. 이에 따라 대한주택공사에서는 슬라임과 시멘트밀크를 충분히 교반하고, 말뚝의 선단이 천공바닥까지 경타하도록 시방서에 규정하고 있다.

5.4 합리적인 시멘트밀크 배합비

앞에서 제안된 말뚝의 단위주면마찰력의 제한치를 지반종류별로 시멘트밀크 배합비와 연계하여 도시하면 그림 15와 같다. 그림 15에서 보는 바와 같이 모든 종류의 지반에서 빈배합 보다는 부배합의 시멘트밀크를 사용할수록 마찰지력은 크게 증가하는 것으로 나타났으며 점성토지반, 사질토지반(모래·자갈층, 풍화토층) 및 암반 순으로 단위마찰지력이 크게 발휘되고 있음을 알 수 있다.

그림 15에서 보는바에 의하면 점성토지반에서 10tf/m^2 정도의 단위주면마찰력을 얻으려면 물시멘트비(W/C)가 68% 보다는 59%인 시멘트밀크를 사용하는 것이 효율적이다. 또한 사질토지반(모래·자갈지반, 풍화토지반)

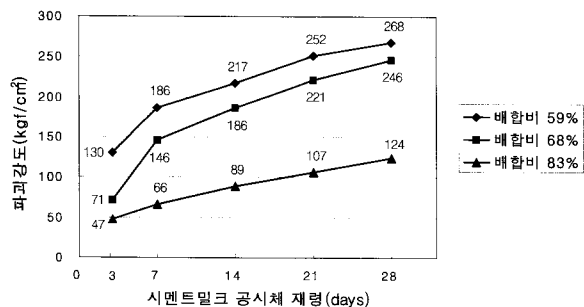


그림 14. 시멘트밀크 배합비별 재령에 따른 파괴강도

에서는 물시멘트 배합비(W/C)가 68%인 시멘트밀크를 사용하더라도 10tf/m^2 의 단위주면마찰력을 얻을 수 있다. 그러나 투수성이 큰 모래·자갈지반에서는 68% 시멘트밀크가 주변지반으로 유실되는 경우가 발생할 수 있으므로 충진이 잘되도록 하기 위해서는 물시멘트비(W/C)가 59%인 시멘트밀크를 사용하는 것이 바람직하다.

한편 풍화암반이나 연암반층에서는 현재 국내에서 주로 83%의 물시멘트 배합비(W/C)가 사용되고 있다. 그러나 암반층에서는 상부에 분포하는 지반의 종류에 따라 결정 선택되는 물시멘트 배합비(W/C)를 같이 사용하게 될 수 있다. 그림 15에 의하면 풍화암반이나 연암반층에서는 83%의 물시멘트 배합비로 사용하여도 10tf/m^2 의 단위주면마찰력이 발휘되고 있음을 알 수 있다. 그러나 이 경우도 83%보다 부배합인 68%의 배합비를 사용하여 합리적인 말뚝 설계와 시공이 가능한 경우가 많이 있었다.

6. 비교·고찰

6.1 선단지지력

앞에서 시멘트밀크 배합비가 선단지지력에 미치는 영향을 분석한 결과, 시멘트밀크 배합비가 매입말뚝의 선단지지력에 미치는 영향은 매우 작은 것으로 확인되었다. 따라서 앞장에서 제안된 말뚝의 선단지반 종류별로 단위선단지지력(q_p)을 정리한 결과는 표 6과 같다.

6.2 주면마찰력

앞장에서 분석하여 얻은 말뚝주변의 지반별로 시멘트밀크 배합비에 따른 주면마찰력 산정식의 결과를 정리

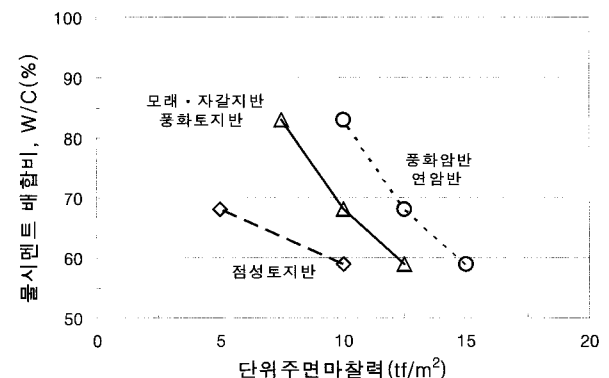


그림 15. 단위주면마찰력에 따른 합리적인 시멘트밀크 배합비

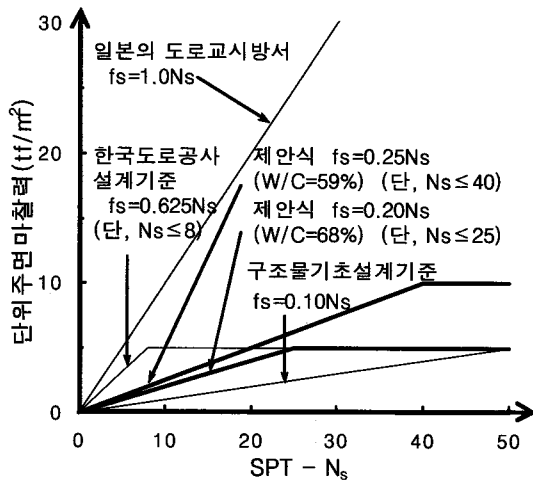
표 6. 지반종류별 단위선단지지력(q_p , tf/m^2)(홍원표·채수근, 2007a)

지반종류	단위선단지지력 (q_p , tf/m^2)	최대단위선단지지력 (tf/m^2)	기준 기준식
점성토지반	15N'	600	(a) 구조물기초설계기준 해설 $q_p=15N'(\leq 750tf/m^2)$:지반구분 없음 (b) 건축기초구조설계기준 $q_p=20N'(\leq 1,200tf/m^2)$:사질토지반
풍화토지반	20N'	1,000	
사질토지반, 풍화암반	25N'	1,250	
연암반	-	1,500	

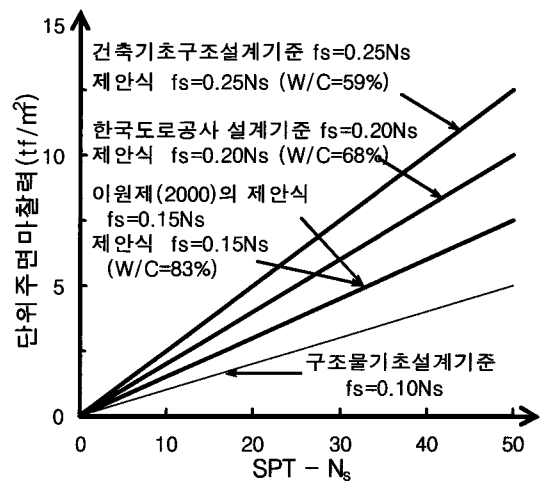
표 7. 시멘트밀크 배합비에 따른 지반종류별 단위주면마찰력(f_s , tf/m^2)

지반종류	배합비	W/C(%)			기준 기준식
		59	68	83	
점성토지반		0.25Ns (≤ 10.0)	0.2Ns (≤ 5.0)	-	(a) 구조물기초설계기준 해설 $f_s=0.1Ns(\leq 5.0tf/m^2)$:지반구분 없음 (b) 건축기초구조설계기준 $f_s=0.25Ns(\leq 12.5tf/m^2)$:사질토지반
사질토지반*		0.25Ns (≤ 12.5)	0.2Ns (≤ 10.0)	0.15Ns (≤ 7.5)	
암반**		0.30Ns (≤ 15.0)	0.25Ns (≤ 12.5)	0.20Ns (≤ 10.0)	

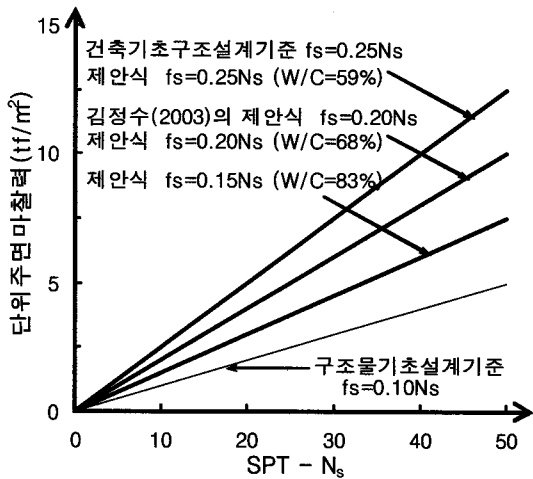
*사질토지반 : 모래 지반, 모래·자갈 지반, 풍화토 지반
 **암반 : 제안값은 풍화암반 기준이며 연암반도 적용 가능함
 () : 제한치(tf/m^2)



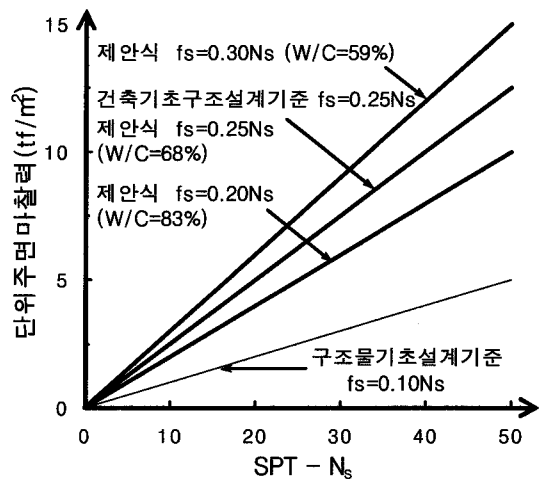
(a) 점성토지반



(b) 사질토지반



(c) 풍화토지반



(d) 풍화암반

그림 16. 지반종류별 단위주면마찰력 산정식 비교

하면 표 7과 같다. 표 7에서 보는 바와 같이 모든 종류의 지반에서 빈배합 보다는 부배합의 시멘트밀크를 사용할 수록 주면마찰력은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 물시멘트 배합비(W/C)가 68%인 경우를 기준으로 배합비를 늘리거나 줄이면 단위주면마찰력은 각각 0.05N_s씩 감소하거나 증가하는 것으로 확인되었다. 이와 같은 현상은 점성토지반, 사질토지반 및 암반에서 모두 동일하게 나타났다.

이 제안식을 각 지반종류별로 기존의 사용식들과 비교하여 보면 그림 16과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 단위주면마찰력에 대한 제안식을 지반종류별로 기존 사용식들과 비교 고찰해 보면, 모든 지반에서 제안식은 구조물기초설계기준식(한국지반공학회, 2003)보다 큰 것으로 나타났다. 또한 제안식은 점성토지반에서는 일본의 도로교시방서 기준식(津田, 2003)보다 작으며, 한국도로공사(2006)에서 제안한 최대주면마찰력보다 같거나 크다. 사질토지반과 풍화토에서는 부배합의 시멘트밀크(물시멘트배합비 59%)를 사용해야만 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)과 동일하고 이보다 빈배합의 경우에는 작게 산정되고 있다. 그러나 풍화암반에서는 시멘트밀크의 물시멘트배합비가 68%이상의 빈배합일 때 건축기초구조설계기준과 동일하거나 작게 산정되는 것으로 확인되었다.

우리나라에서 사용된 기존의 단위주면마찰력 산정식은 지반의 구분 없이 표준관입시험치 N'의 0.1배 혹은 0.25배로 일률적으로 제안 사용되고 있으나 본 논문에서 제안한 바와 같이 지반의 종류에 따라 구분하여 사용함이 바람직하다.

7. 결론

SDA매입공법으로 시공한 379본의 시험말뚝에 대해 말뚝재하시험을 시행한 결과를 이용하여 지반종류별로 시멘트밀크 배합비에 따른 연직지지력을 정량적으로 산정하는 경험식을 수립·제안하였다. 이들 시험결과를 분석하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝지지반의 N'값과 비례관계에 있다. 그러나 시멘트밀크 배합비는 매입말뚝의 선단지지력에 미치는 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 이것은 말뚝을 최종설치하는 방법으로 경타방식을 채택할 경우 말뚝 선

단부가 천공바닥의 원 지반 내에 관입되기 때문인 것으로 판단된다.

- (2) SDA매입말뚝의 단위마찰지지력(f_s)은 말뚝주변 지반종류와 표준관입시험치 N과 비례관계에 있으며, 특히 선단지지력과 달리 마찰지지력은 시멘트밀크 배합비의 영향이 매우 크다. 즉 68%인 물시멘트 배합비(W/C)를 기준으로 시멘트밀크의 배합비를 늘리거나 줄이면 단위주면마찰력은 각각 0.05N_s씩 감소하거나 증가한다. 이와 같은 현상은 점성토지반, 사질토지반 및 암반에서 모두 동일하다. 다만 단위주면마찰력의 최대치는 점성토지반에서는 시멘트밀크 배합비에 따라 최대 N_s값 25 또는 40에 대응하는 값을 사용하고, 사질토지반과 풍화암반은 최대 N_s값 50에 대응하는 값을 사용하는 것이 타당하다.
- (3) 동일한 지반조건이라도 시멘트밀크 배합비에 따라 단위주면마찰력이 달라지는 것으로 확인되었다. 특히 빈배합비보다는 부배합비의 시멘트밀크를 사용할 수록 단위주면마찰력이 증가된 것을 볼 때 시멘트밀크의 배합비는 매입말뚝의 지지력을 확보하는데 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 따라서 지반종류별로 합리적인 시멘트밀크 배합비를 제안할 수 있는데 점성토지반과 사질토지반은 59%의 물시멘트 배합비(W/C)가 유리하며, 풍화토지반과 풍화암반은 68%의 배합비를 사용하여야 합리적인 말뚝 설계와 시공이 가능하다.
- (4) 마찰지지력에 대한 제안식은 전체평균값으로 구한 것이며 지반종류별로 기존 식과 비교 고찰해 보면, 모든 지반에서 국내 구조물기초설계기준식보다 크다. 그러나 점성토지반에서는 일본의 도로교시방서 기준식보다 작으며, 사질토지반에서는 부배합의 시멘트밀크(물시멘트배합비 59%)를 사용해야만 건축기초구조설계와 동일하다. 풍화토지반에서는 건축기초구조설계기준식보다 작다. 그러나 풍화암반에서는 시멘트밀크의 물시멘트배합비가 68%이상이어야 건축기초구조설계기준과 동일하게 된다.
- (5) 매입말뚝의 지지력은 시멘트밀크의 배합비와 지반조건 외에도 시공장비의 효율과 현장의 품질관리 정도에 따라 달라질 수 있기 때문에 제안한 지지력 산정식은 지지력을 과대 또는 과소평가할 수 있다. 따라서 표준관입시험의 정밀도를 높이고 현장에서는 표준시공법과 품질관리 기준을 준수해야하며, 시험시공과 재하시험을 먼저 시행하여 시공장비의

효율과 현장의 품질관리 정도로 결정되는 말뚝길이와 설계지지력으로 기초설계를 진행하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임을 밝히며, 이에 감사드리는 바이다. 또한 본 연구의 말뚝재하시험 수행에 있어서 지에스이앤씨(주) 지반조사 및 재하시험부의 류경렬실장, 김형식대리, 김준호대리가 많은 도움을 주었으며, 이에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

참고 문헌

- 김정수 (2003), *화강풍화대 지반에 매입된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구*, 박사학위논문, 한양대학교, pp.161-165.
- 대한건축학회 (2005), *건축기초구조설계기준*, pp.172-184.
- 대한주택공사 (1997), *표준시방서(건축) 30535 말뚝선굴착공법*, pp.1-9.
- 대한토목학회 (2001), *도로교설계기준 해설*, pp.207-313.
- 두성건설 (1987), *SIP 기초공법*, pp.1-68.
- 서울특별시 (1996), *지반조사 편람*, pp.22-24.
- 서영화, 조성한, 최도용, 한병권 (2003), “말뚝 매입공법의 최적 설계기준 연구”, *대한토목학회지*, 제51권 제7호 pp.8-16.
- 이명환 외 (1992), “실측에 의한 표준관입시험 함마의 낙하속도 분석”, *한국지반공학학회지*, 제8권 1호, pp.59-66.
- 이 송, 박준홍, 박중배, 김태훈 (2002), “국내 SIP 말뚝의 지지력 특성에 관한 연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제18권 4호, pp.319-327.
- 이원제 (2000), *광섬유센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정 및 지지력 특성 연구*, 박사학위논문, 고려대학교, pp.114-121.
- 임해식, 박용부, 박중배, 김정수, 한경렬, 김도형 (2001), *SIP 공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구*, 대한주택공사 주택연구소, pp.68-79.
- 채수근 (1997), “SDA 매입말뚝 신공법 연구 및 적용성 검토서”, pp.1-110.
- 채수근 (2000a), “Q&A 매입말뚝 시공법”, *한국지반공학학회지*, Vol.16, No.7 pp.63-68.
- 채수근 (2000b), “SDA 매입말뚝 신공법 -한국고속철도 3공구 평택코가 적용 사례 중심으로”, *대한토목학회지*, 제48권 제9호 pp. 54-62.
- 채수근 (2002), *SDA 매입말뚝의 연직지지력 산정*, 석사학위논문, 중앙대학교, pp.1-121.
- 채수근 (2004), *기초공사실무*, (재)건설산업교육원, pp. 66-70.
- 채수근 (2005), *말뚝기초실무*, (재)전문건설공제조합 기술교육원, pp.22-27.
- 채수근 (2007), *시멘트밀크 배합비에 따른 다양한 지반 내 SDA 매입말뚝의 연직지지력*, 박사학위논문, 중앙대학교, pp.1-262.
- 한국도로공사 (2006), “한국도로공사의 SIP공법 소개”, *2006 현장기술자를 위한 기초기술 워크샵*, 한국지반공학회, pp.103-124.
- 한국지반공학회 (2003), *구조물기초설계기준 해설*, pp.286-292.
- 홍원표, 한중근, 채수근 (2002), “SDA 매입말뚝의 마찰지지력”, *대한토목학회 학술발표논문*, pp.5-8.
- 홍원표, 채수근 (2007a), “지반의 종류별 SDA 매입말뚝의 선단지지력 산정”, *한국지반 공학회논문집*, 한국지반공학회, 제23권, 5호, pp.111-129.
- 홍원표, 채수근 (2007b), “지반종류별 SDA 매입말뚝의 마찰지지력 산정”, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제27권, 제4C호, pp.279-292.
- (社)콘크리트 파일 建設技術協會 (1994), “埋入工法 施工便覧”, pp.13-182.
- 津田 和義 (2003), *既製 콘크리트 杭 - 基礎構造設計 manual - 土木編*, (社)コンク リート 파일 建設技術協會, 附録5-1~5-5.
- COPITA (2006), (社)콘크리트 파일 建設技術協會, Concrete Pile Installation Technology Association, 2006. 4. NO.39, pp.21-76.
- Hong, Won-Pyo and Chai, Soo-Geun (2003), “Skin Friction Capacity of Separated Doughnut Auger (SDA) Pile”, *The Proceeding of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2003)*, Honolulu, Hawaii, U.S.A, pp.740-745.
- Hong, Won-Pyo and Chai, Soo-Geun (2005), “Bearing Capacity Characteristics of Separated Doughnut Auger (SDA) Pile in Clay and Silty Soil”, *The Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2005)*, Seoul, Korea, pp.548-554.
- GRL Associates Inc. (1996), *Case Pile Wave Analysis Program Manual*.
- Pile Dynamics Inc. (1995), *PDI User Manual*.

(접수일자 2007. 9. 3, 심사완료일 2008. 5. 16)