

사질토 지반에서 시멘트밀크 주입비에 따른 매입말뚝의 수평지지력

The Lateral Load Capacity of Bored-Precast Pile Depending on Injecting Ratio of Cement Milk in Sand

홍원표¹, 윤중만^{2*}

Won-Pyo Hong¹, Jung-Mann Yun^{2*}

¹Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 156-756, Republic of Korea

²Member, Professor, Department of Construction Information System, Shin Ansan Univ., 135, Shinansandeahak-Ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 452-792, Republic of Korea

ABSTRACT

In order to investigation Lateral bearing capacity of bored-precaster pile, we carried out the analysis of the relationship between Lateral load and horizontal displacement using the result of horizontal pile load test. The six piles injected cement milk of 50%, 70% and 100% of the embedded length of pile were used in the horizontal pile load test. The horizontal displacement, yielding load and horizontal bearing capacity are mainly affected by The injecting ratio of cement milk (injected length of cement milk/embedded length of pile). As the injecting ratio of cement milt is increased, the starting point of horizontal displacement in piles become close to the ground surface and the amount of horizontal displacement is decreased. Also, the horizontal bearing capacity and yielding load are highly increased with increasing the ration of cement milk. The horizontal bearing capacity and yielding load of bored pile with 1 of cement milk ratio are about two or three times those of pile with 0.5 of cement milk ratio.

요 지

매입말뚝의 수평저항 특성을 고찰하기 위하여 매입말뚝에 대한 수평재하시험을 실시하여 수평하중과 수평변위관계를 분석하였다. 말뚝수평재하시험은 시멘트 밀크가 말뚝매입길이의 50%, 70%, 100%로 주입된 6개의 말뚝에 대하여 실시하였다. 시멘트 밀크의 주입비(시멘트 밀크 주입길이/말뚝의 길이)는 매입말뚝의 수평변위, 항복하중, 수평지지력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 시멘트 밀크의 주입비가 증가할수록 매입말뚝의 수평변위가 발생되기 시작하는 위치는 지표면에 가까워지며 말뚝의 수평변위는 감소한다. 그리고 말뚝의 수평지지력과 항복하중은 시멘트 밀크 주입비가 증가할 수록 크게 나타났다. 시멘트 밀크 주입비가 1인 매입말뚝의 항복하중과 극한수평지지력은 시멘트 밀크 주입비가 0.5인 경우보다 약 2~3배 정도 크게 나타났다.

Keywords : Bored-Precaster pile, Lateral bearing capacity, Yield load, Lateral load test, Horizontal displacement

1. 서 론

매입말뚝공법은 지반을 말뚝설치 공간만큼 미리 굴착 한 후 기성말뚝을 삽입하여 설치하는 것으로 본 공법의 가

장 큰 장점은 진동과 소음이 타입말뚝에 비하여 적다는 것이다. 그러나 지반굴착에 따른 지반의 이완, 지반조건, 현장조건, 말뚝의 재질 등 여러 요인에 따라 지지력 및 효율에 많은 차이가 발생하므로 매입말뚝의 지지력을 산정하는데 상당한 어려움이 있었다.

De Beer(1988), Kusakabe et al.(1994)은 시공법에 따른 매입말뚝의 지지력 특성과 하중전이효과 등에 대한 연구

Received 6 Dec. 2013, Revised 23 Dec. 2013, Accepted 24 Dec. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-490-6155; Fax: +82-31-490-6075

E-mail address: jmyun@sau.ac.kr(J. M. Yun)

를 진행하여 매입말뚝의 지지력 특성을 규명하였으며, 국내에서도 매입말뚝에 대한 연구가 활발히 진행되어 새로운 저공해 매입말뚝 시공법이 개발되었으며 본 공법에 대한 지지력 특성도 연구된 바 있다(Paik(1997)). 2000년 이후부터 대부분의 건축, 토목구조물의 말뚝기초로 매입말뚝 공법이 적용되면서 시공방법에 따른 매입말뚝의 연직 지지력 특성에 대한 연구가 진행되기 시작하였다(Lee et al(2002), Chai(2002)). 특히, Hong and Chai(2007a, 2007b)는 지반종류별 매입말뚝의 선단지지력 및 마찰지지력 산정방법을 제안하였으며, 시멘트 밀크 배합비가 매입말뚝의 연직지지력에 미치는 영향도 검토하였다(Hong et al. (2008)). 최근에는 매입공법으로 시공된 PHC 말뚝 선단에 강관을 부착한 매입말뚝에 대한 선단지지력 증대효과를 검증한 연구도 진행되고 있다(Paik and Yang(2013)). 이와 같이 매입말뚝의 연직지지력 특성에 대한 연구는 국, 내외에서 활발히 진행되어 많은 연구성과가 발표되었으나 매입말뚝의 수평지지력에 대한 연구는 아직까지 활발히 진행되지 않고 있어 연구결과도 미비한 실정에 있다.

따라서, 본 연구에서는 시멘트 밀크 주입비가 매입말뚝의 수평지지력에 미치는 영향을 조사하여 매입말뚝의 수평지지력 특성을 규명하고자 한다. 이를 위하여 매입말뚝이 설치된 현장에서 시멘트 밀크를 말뚝길이의 50%, 70%, 100%로 주입한 후, 수평재하시험을 실시하여 매입말뚝의 수평거동을 분석하였다. 그리고 매입말뚝의 수평재하시험으로부터 얻은 하중-변위곡선을 토대로 항복하중과 변위량과의 관계를 분석하고 시멘트 밀크 주입비가 매입말뚝의 수평지지력 특성에 미치는 영향도 고찰하였다.

2. 말뚝의 수평지지력

말뚝의 길이는 짧은 말뚝과 긴 말뚝으로 나누며, 구분방법은 수평하중과 지반반력에 의해 발생하는 최대휨모멘트를 항복모멘트와 비교하는 방법을 사용하였다. $M_{max} < M_y$ 인 경우에는 짧은 말뚝으로 취급하며, $M_{max} > M_y$ 인 경우에는 긴 말뚝으로 취급한다. 또한, 말뚝의 극한수평지지력은 말뚝 자체의 항복모멘트에 의해 결정한다. 말뚝머리의 구속조건은 두부자유와 두부회전구속으로 나눈다. 두부자유는 말뚝머리에서 모멘트가 0이고, 두부회전구속은 말뚝머리에서 회전각이 0이다.

2.1 두부자유말뚝

L_1 은 최대 휨모멘트가 발생하는 지반의 깊이이고, R_f 는 말뚝 선단부의 회전점 아래에 발생하는 반대방향의 지반반력의 합을 나타내며, K_{A2} 는 지반반력계수를 나타낸다. $P_u(L_s)$ 는 다음식에 $z=L_s$ 를 대입하여 구한다(Fig. 1).

$$P_u(z) = K_{A2} \cdot \gamma z d \quad (1)$$

짧은 말뚝은 Fig. 1(a)와 같이 말뚝이 수평하중을 받을 경우 말뚝의 선단을 중심으로 회전한다고 생각한다. 지반반력은 식 (1)에 의거하여 삼각분포를 나타내며 선단을 중심으로 모멘트평형을 고려하면, 짧은 말뚝의 극한수평지지력은 다음식이 구하여 진다.

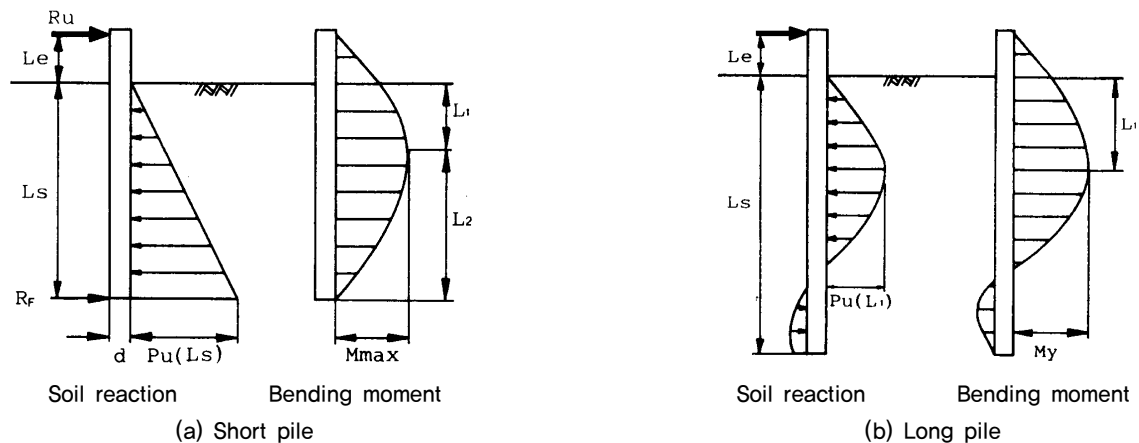


Fig. 1. Free head

$$R_u(L_e + L_s) - \int_0^{L_s} P_u(z)(L_s - z)dz = 0 \quad (2)$$

$$\therefore R_u = \frac{K_{A2} \cdot \gamma d L_s^3}{6(L_e + L_s)} \quad (3)$$

최대모멘트 (M_{max})가 발생하는 위치 L_1 에서의 전단력은 0이다.

$$R_u - \int_0^{L_1} P_u(z)dz = 0 \quad (4)$$

$$\therefore L_1 = \sqrt{\frac{2R_u}{K_{A2}\gamma d}} \quad (5)$$

L_1 에서, 최대모멘트는 다음과 같다.

$$M_{max} = R_u(L_e + \frac{2}{3}L_1) \quad (6)$$

말뚝길이를 증가시키면, $M_{max} > M_y$ 가 되고, 긴 말뚝으로 취급한다. Fig. 1(b)에서 말뚝이 길어지면 말뚝내에 항복모멘트가 발생하는 곳에 소성힌지가 발생하며, 소성힌지 아래에서는 완전한 하중전달이 되지 않으므로, 지반의 반력분포는 L_1 까지만 완전한 극한지반반력 분포를 보인다. 따라서,

$$M_y = R_u(L_e + \frac{2}{3}L_1) \quad (7)$$

식 (5), (7)에서 수평지지력은 다음과 같다(홍원표 (1984)).

$$R_u = \frac{M_y}{L_e + \sqrt{\frac{8R_u}{9K_{A2}\gamma d}}} \quad (8)$$

2.2 두부회전구속말뚝

말뚝머리의 구속조건이 구조물 하부의 cap등에 의해 회전이 구속되면 말뚝머리에서 변위와 모멘트가 발생한다. Fig. 2(a)에서 짧은 말뚝의 지반반력 분포는 두부자유 말뚝과 동일하며 휨모멘트는 두부에서 큰 모멘트를 발생시킨다. 따라서 말뚝의 극한수평지지력은 수평방향 힘의 평형조건으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$R_u = \int_0^{L_s} P_u(z)dz = \frac{1}{2}K_{A2} \cdot \gamma d L_s^2 \quad (9)$$

또한, 말뚝머리에서 최대 휨모멘트는 다음과 같다.

$$M_{max} = R_u(L_e + \frac{2}{3}L_1) \quad (10)$$

이 최대모멘트가 말뚝의 항복모멘트를 초과하게 되면 말뚝머리에 소성힌지가 발생하며, 선단의 회전점을 중심으로 회전하면서 이동한다. 말뚝선단에서는 반대방향의 지반반력 R_F 가 발생한다. 따라서 말뚝에 작용하는 외력의 수평방향의 평형조건으로부터 다음식이 구하여 진다.

$$R_u + R_F = \int_0^{L_s} P_u(z)dz \quad (11)$$

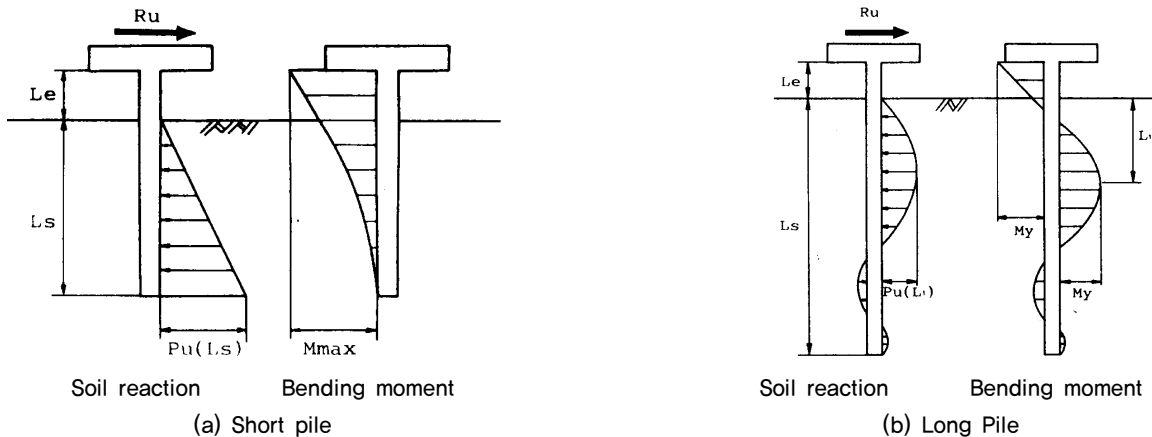


Fig. 2. Fixed head

말뚝머리에서 휨모멘트를 항복모멘트 M_y 로 하면,

$$M_y = \int_0^{L_s} P_u(z)(z+L_e)dz - R_F(L_e+L_s) \quad (12)$$

$$= R_u(L_e+L_s) - \frac{1}{6}K_{A2}\gamma dL_s^3$$

따라서, 수평지지력은 다음과 같다.

$$\therefore R_u = \frac{1}{L_e+L_s} \left(\frac{1}{6}K_{A2}\gamma dL_s^3 + M_y \right) \quad (13)$$

말뚝길이를 더욱 증가시키면, $M_{\max} \gg M_y$ 가 되며, Fig. 2(b)에서 처럼 말뚝머리에서는 부(-)의 M_{\max} 와 지반깊이 L_1 에서는 정(+)의 M_{\max} 가 모두 M_y 에 도달상태에서 파괴된다. L_1 위치에서 정의 최대모멘트는 다음과 같다.

$$M_{\max}^+ = R_u \left(L_e + \frac{2}{3}L_1 \right) - M_{\max}^- \quad (14)$$

M_{\max}^- 는 식 (10)로 구할 수 있으며, 부(-), 정(+) M_{\max} 가 M_y 에 도달한 상태에서 R_u 는 식 (5)와 식 (14)에 의해 구한다.

$$R_u = \frac{2M_y}{L_e + \sqrt{\frac{8R_u}{9K_{A2}\gamma d}}} \quad (15)$$

식 (8)과 식 (15)를 비교하여 보면, 두부구속말뚝의 R_u 가 두부자유말뚝의 수평지지력의 2배임을 알 수 있다.

3. 시험현장

3.1 지반조건

말뚝재하시험을 실시한 현장은 도심지에서 시공된 아파트 신축현장으로 아파트구조물의 기초공으로 매립말뚝이 시공되었다. 시공현장의 지층구성은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 매립층, 점토층, 모래-자갈층, 풍화암층으로 이루어졌다. 매립층은 대부분 실트질모래, 모래질실트 등이 혼재되어 있으며 습윤상태를 나타내고 있다. 매립층 하부에는 점토층이 3~5m정도의 두께로 분포되어 있으며 하부로 갈수록 굳은 상태를 나타내고 있다. 점토층 하부에는 모래층과 모래자갈층이 8~10m정도의 두께로 두텁게 분포되어 있으며 조밀또는 매우 조밀한 상대밀도를 보인다. 모래자갈층 하부에는 풍화암층과 연암층이 나타나고 있다. 풍화암층은 중간정도의 풍화도를 보이고 있으며, 매우

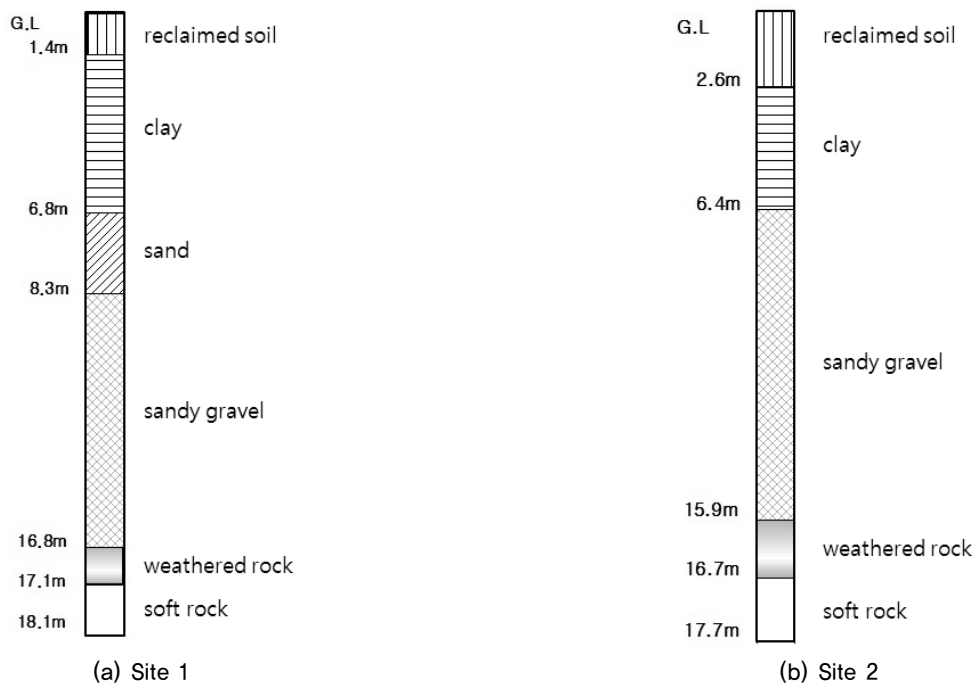


Fig. 3. Soil profile

조밀한 상태이다. 그리고, 연암층은 심한 풍화로 인해 균열이 상당히 진행되어 있다.

3.3 시험말뚝시공

본 현장의 아파트 기초공사에 사용된 말뚝은 직경 ϕ 400mm, 두께 65mm, 길이 15m의 중공형 PHC말뚝이다. 말뚝시공시 굴착속도는 약 35~50cm/min이며, 속파기공법으로 이루어졌다. 매입말뚝은 지표면으로부터 약 14.2~14.3m에 이르는 연암층 상단까지 이음이 없는 하나의 기성말뚝으로 설치되어 있으며 선단부는 폐쇄되어 있다.

매입말뚝의 수평지지력을 향상시키기 위해 시멘트 밀크는 3단계로 주입하는 것으로 하였다. 1단계 주입은 천공 완료 후 오거스크류를 통해 시멘트 밀크를 주입하였으며, 2단계 주입은 말뚝 삽입 후, 시멘트 밀크를 주입하면서 케이싱을 인발하였다. 그리고 3단계 주입은 말뚝 경타 후에 시멘트 밀크를 추가 주입하였다. 그러나 2단계 주입과정에서 케이싱을 제거한 후 시멘트 밀크가 주변 모래자갈층의 공극으로 유입되어 시멘트 밀크가 유실되는 현상이 발생하였다.

따라서 본 논문에서는 시멘트 밀크 주입비(시멘트 밀크 주입길이/말뚝의 길이)가 매입말뚝의 수평지지력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 말뚝 길이의 50%정도 주입된 말뚝과 시멘트 밀크를 추가로 주입하여 70%, 100%까지 채운 말뚝에 대해서 각각 수평재하시험을 실시하였다.

3.4 시험장치 및 방법

말뚝수평재하시험은 정적수평재하방법 가운데 일방향으로 하중을 재하하여 하중과 변위관계를 구하는 방법을 채택하였다. Fig. 4는 시험말뚝과 반력말뚝의 설치간격, 경사계 및 로드셀(하중계)의 설치상태를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 시험말뚝과 반력말뚝과의 중심간 거리는 1.2m정도이며, 일방향재하시험시 시험말뚝 주변지반의 영향범위 조건을 충족시키고 있다.

이 시험에 사용된 다이얼 게이지의 정도는 1/100mm이다. 오일잭은 500kN까지 하중을 가할 수 있으며, 로드셀은 최대 100kN까지 받을 수 있는 것을 사용하였다. 한편, 수평재하시험시 각 하중단계는 계획최대하중을 5단계로 나누어 재하하는 것으로 하였다. 각 단계의 하중증가시 하중유지시간은 15분으로 하였으며 하중감소시에는 5분간 유지시키는 것으로 하였다.

4. 말뚝재하시험 결과

4.1 매입말뚝의 수평거동

Fig. 5는 수평재하시험시 말뚝내부에 설치된 경사계로부터 얻은 시멘트 밀크 주입비에 따른 말뚝의 수평변위를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 시멘트 밀크의 주입비가 0.5(말뚝선단으로부터 7m(50%)까지 주입)인 매입말뚝의 최대수평변위는 33.45mm로 최상단부에서 발생하였다. 말뚝의 수평변위는 매입길이에 따라 상부로부터

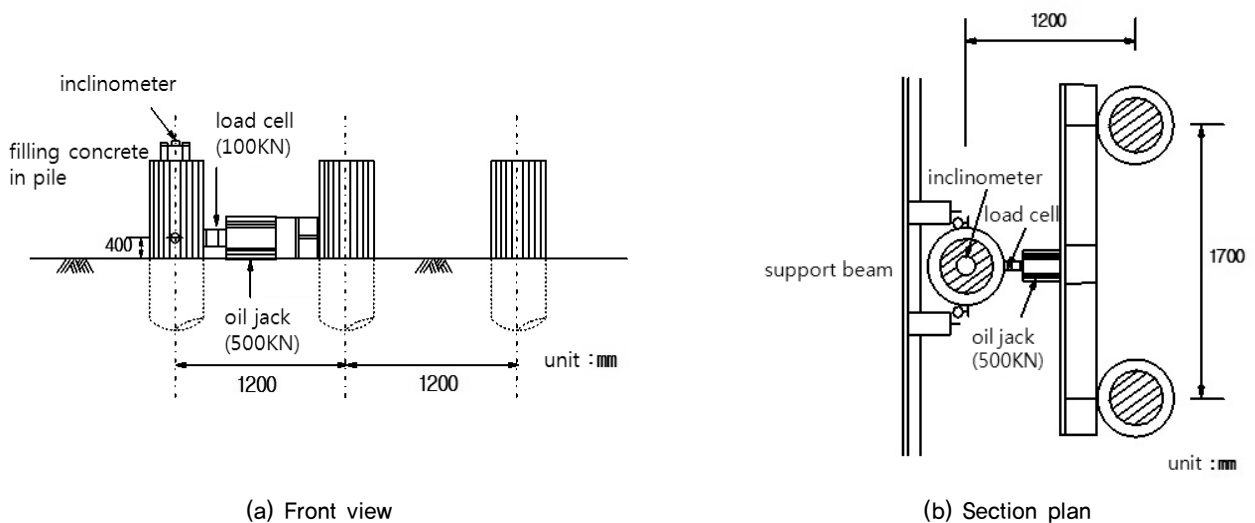


Fig. 4. Test pile set-up

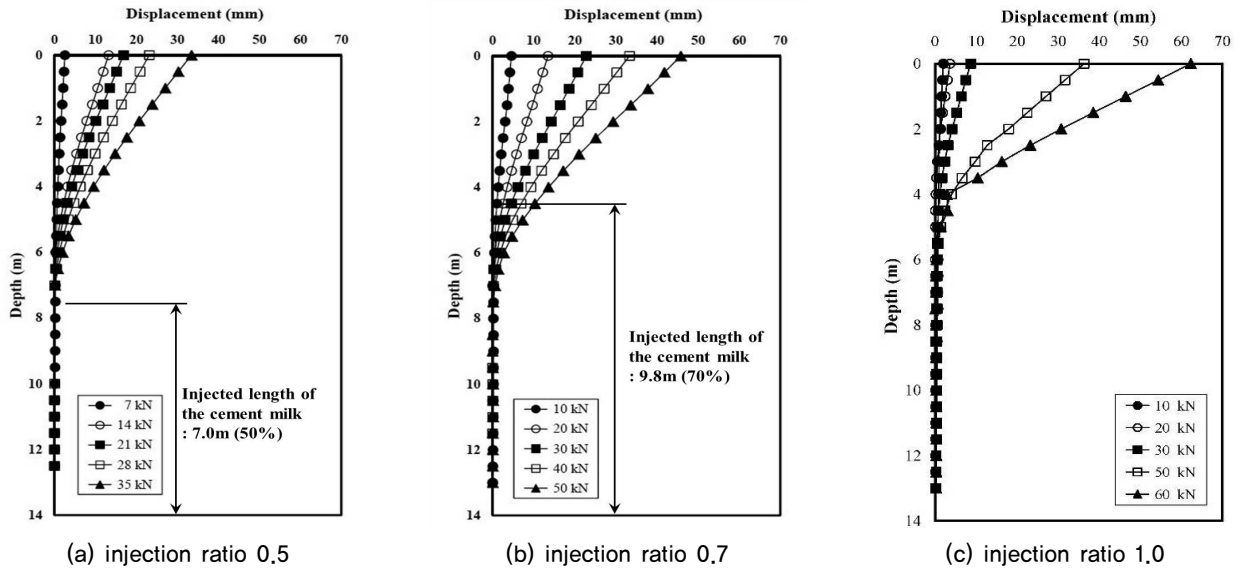


Fig. 5. Horizontal displacement of piles depending on injecting ratios of cement milk

터 하부로 갈수록 거의 선형적으로 감소하고 있으며 수평 변위 발생위치는 지표면에서 약 7m 깊이인 말뚝의 중간부분이다. 이 부분은 지층구조상 연약층과 모래자갈층의 경계부에 해당되기도 한다.

Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 시멘트 밀크의 주입비가 0.7(말뚝선단으로부터 9.8m(70%)까지 주입)인 매입말뚝의 경우에는 최대수평변위는 45.82mm 발생하였고 수평 변위 발생위치는 시멘트 밀크가 50% 주입된 말뚝과 동일하게 말뚝의 중간부분인 7m 정도에서 발생하고 있다.

한편, Fig. 5(c)에 나타난 바와 같이 시멘트 밀크의 주입비가 1(말뚝 두부(100%)까지 주입)인 매입말뚝의 최대수평변위는 62.26mm 발생하였으며, 말뚝의 수평변위는 작용하중 30kN 이하에서는 변위가 매우 작게 발생하나 50kN에서 60kN으로 증가할 때 변위가 급격히 증가함을 알 수 있다. 한편, 수평변위 발생위치는 지표면으로부터 약 5m떨어진 깊이에서 발생하고 있다. 따라서, 매입깊이가 증가할수록 즉, 시멘트 밀크 주입비가 증가할수록 동일한 하중단계에서는 매입말뚝의 수평변위의 발생위치는 지표면으로 가까워진다는 것을 알 수 있다.

4.2 수평하중과 수평변위량

Fig. 6은 시멘트 밀크의 주입비에 따른 말뚝의 수평하중과 경사계로부터 측정된 말뚝의 최대수평변위량과의 관계를 도시한 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 시멘트 밀크의 주입비에 관계

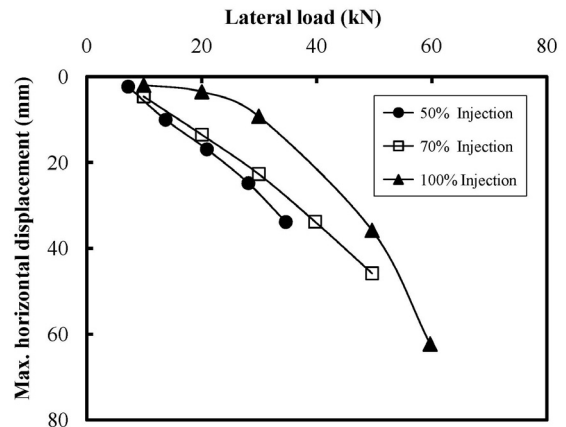


Fig. 6. Lateral load-max. horizontal displacement curves

없이 작용하중이 증가함에 따라 말뚝의 수평변위량은 증가하고 있다. 또한, 동일한 하중단계에서는 시멘트 밀크 주입비가 증가할수록 말뚝의 수평변위는 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이 시험에서 시멘트 밀크 주입비가 작은 경우에는 수평하중의 크기가 작은 경우만 시험이 실시되어 정확한 강도를 측정하기가 어렵지만 대략적으로 경향은 하중이 커지면 수평변위가 세 경우 모두 수렴해 가는 것 같이 보인다.

따라서, 시멘트 밀크 주입비의 영향은 하중의 크기가 작은 초기변형시기에 크게 나타나고 하중의 크기가 커질수록 영향이 작아짐을 알 수 있다. 즉, 이는 매입말뚝의 시멘트 밀크 주입비가 1인 경우 초기하중에 대하여는 시멘트 밀크의 효과에 의하여 말뚝변위가 어느 정도 억제되지만 하중이 커지면 시멘트 밀크의 효과를 넘어 지반의 반력에

만 영향을 받는 것으로 생각된다.

5. 분석 및 고찰

5.1 항복하중

수평재하시험결과로부터 얻은 하중과 수평변위와의 관계를 P-S곡선으로 정리하여 항복하중을 산정하였다. 시멘트 밀크 주입비가 0.5인 말뚝에서는 항복하중이 20~30kN 정도로 작게 나타나고 있으며 70% 주입된 말뚝에서는 40kN 정도로 크게 나타났다. 한편, 시멘트 밀크를 100% 주입한 말뚝에서는 항복하중이 50kN 이상으로 크게 나타나고 있다. 따라서, 동일한 말뚝을 사용하였을 경우에도 말뚝주변의 시멘트 밀크 주입정도에 따라 말뚝이 받을 수 있는 수평하중이 다르게 나타남을 알 수 있다.

5.2 극한수평지지력

Fig. 7은 시멘트 밀크 주입비에 따른 극한수평지지력을 짧은 말뚝과 긴 말뚝으로 구분하여 도시한 것이다. 그림에서 짧은 말뚝 및 긴 말뚝의 극한수평지지력은 본 시험말뚝

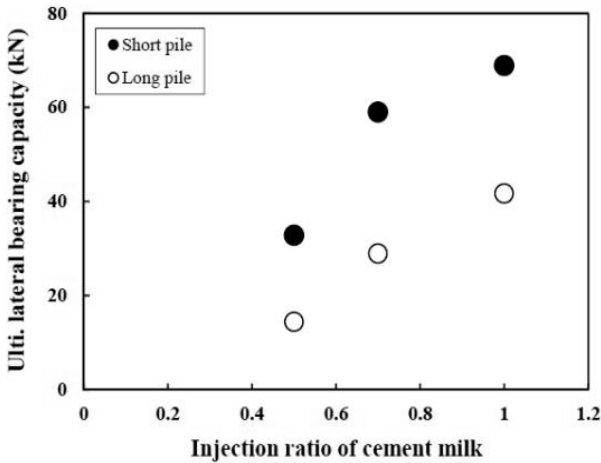


Fig. 7. Ultimate lateral bearing capacity depending on injection ratio of cement milk

의 두부조건이 두부자유이므로 2.2절에서 식 (8)을 이용하여 산정하였다. 단, 긴 말뚝의 극한수평지지력 산정시 L_1 의 길이는 경사계에서 말뚝의 변위발생위치를 힌지점으로 가정하여 산정하였다.

그림에 나타난 바와 같이 시멘트 밀크 주입비가 증가할수록 말뚝의 극한수평지지력도 증가하고 있다. 또한, 짧은 말뚝의 극한수평지지력이 긴 말뚝인 경우보다 1.5~2배 정도 크게 나타나고 있다.

5.3 항복하중과 극한수평지지력의 관계

Fig. 8은 항복하중과 극한수평지지력과의 관계로 나타낸 것이다. 여기서 사용한 말뚝은 Broms(1964)가 제시한 말뚝구분 기준에 따라 계산한 결과이며, 짧은 말뚝으로 판정되어 극한수평지지력 계산시 짧은 말뚝인 경우의 산정식을 사용하였다.

이 그림에 나타난 바와 같이 항복하중(P_y)와 극한수평지지력(R_u) 사이에는 선형적인 상관관계를 보이고 있으며 극한수평지지력은 항복하중의 1.5배 정도 큰 것으로 나타났다. 한편, Table 1은 시멘트 밀크 주입비에 따른 말뚝의 항복하중과 극한수평지지력을 나타낸 것이다.

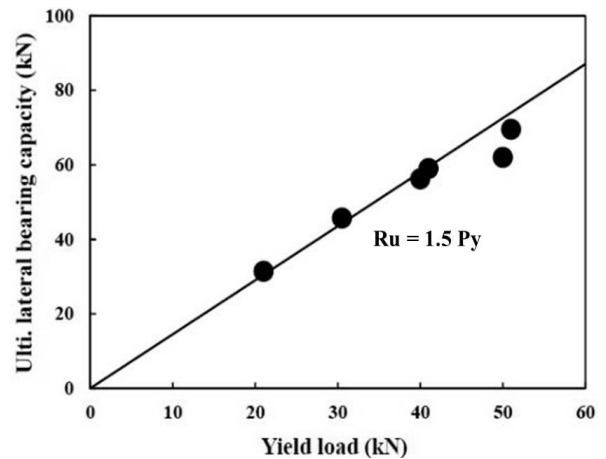


Fig. 8. Relationship between ultimate lateral bearing capacity and yield load

Table 1. Yield load and ultimate lateral bearing capacity of piles

(Unit : kN)

	Site 1			Site 2		
	Pile 1	Pile 2	Pile 3	Pile 4	Pile 5	Pile 6
Injection ratio of cement milk	0,5	0,7	1,0	0,5	0,7	1,0
Yield load	21	40	50	30,5	41	51
Ultimate lateral bearing capacity	31,4	56,2	62	45,7	59	69,5

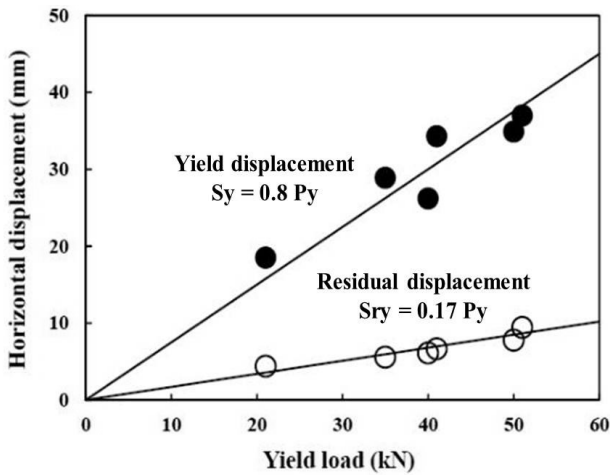


Fig. 9. Relationship between horizontal displacement and yield load

5.4 항복하중과 변위량의 관계

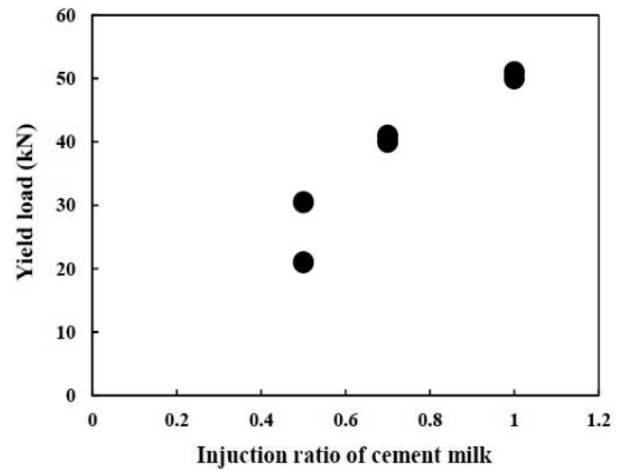
Fig. 9는 항복하중과 항복변위량, 그리고 잔류변위량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 항복변위량과 잔류변위량은 항복하중이 증가함에 따라 선형적으로 증가하고 있다. 그리고 말뚝이 항복하중에 도달할 때 발생한 항복변위량은 잔류변위량의 약 4~5배 정도 크게 나타났다. 그림에서 잔류(소성)변위량은 항복변위량 중에서 탄성변위량을 제외한 변위량이다.

5.5 시멘트 주입비의 영향

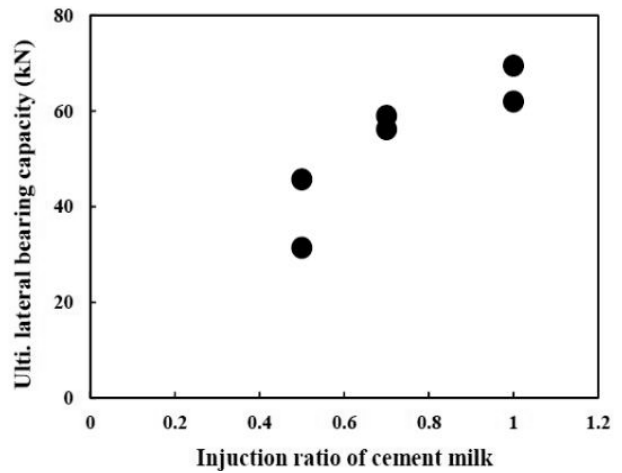
Fig. 10은 시멘트 주입비에 따른 항복하중과 극한수평 지지력의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 시멘트 밀크 주입비의 증가에 따라 매입말뚝의 항복하중은 선형적으로 증가하고 있다. 시멘트 밀크 주입비가 0.5인 경우 항복하중은 20kN 정도로 나타나고 있으나, 주입비가 1.0으로 증가하였을 경우에는 3배에 이르는 60kN 정도로 항복하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10(b)에 나타나 바와 같이 극한수평지지력도 항복하중과 마찬가지로 시멘트 밀크 주입비에 비례하여 증가하고 있으며, 시멘트 밀크 주입비가 매입길이의 1인 경우가 0.5인 경우보다 약 2배 정도 크게 나타나고 있다.

6. 결론

매입공법으로 시공된 말뚝의 수평지지력 특성을 검토하기 위하여 수평재하시험 결과를 분석, 고찰하여 다음과



(a) Yield load



(b) Ultimate lateral bearing capacity

Fig. 10. Variation of yield load and ultimate lateral bearing capacity depending on injection ratio of cement milk

같은 결론을 얻었다.

- (1) 시멘트 밀크 주입비가 증가할수록 매입말뚝의 수평 변위가 발생되기 시작하는 위치는 지표면으로 가까워지며 동일한 하중단계에서는 시멘트 밀크 주입비가 증가할수록 말뚝의 수평변위는 감소한다.
- (2) 시멘트 밀크 주입비의 영향은 하중의 크기가 작은 초기변형시기에 크게 나타나고 하중의 크기가 커질수록 영향이 작게 나타났다. 이는, 초기하중에 대하여는 시멘트 밀크의 효과에 의하여 말뚝변위가 어느 정도 억제되지만 하중이 커지면 시멘트 밀크의 효과를 넘어 지반의 반력에만 영향을 받는 것을 의미한다.
- (3) 시멘트 밀크 주입비는 말뚝의 극한수평지지력과 선형적인 상관관계를 보이고 있으며 말뚝주변의 시멘트 밀크 주입정도에 따라 말뚝이 받을 수 있는 수평

하중의 크기는 다르게 나타났다.

- (4) 시멘트 밀크 주입비가 증가할 수록 말뚝의 항복하중과 수평지지력은 증가하고 있다. 즉, 시멘트 밀크 주입비가 1.0인 매입말뚝의 항복하중과 극한수평지지력은 시멘트 밀크 주입비가 0.5인 경우보다 약 2~3배 정도 크게 나타나고 있다.

References

1. Broms, B.B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soil", *Jour., SMFD, ASCE*, Vol.90, No.SM3, pp.123-156.
2. Chai, S.G. (2002), "Evaluation of vertical bearing capacity of SDA pile", MS Thesis, Chung-Ang. University.
3. De Beer, E. (1988), "Different behavior of bored and driven piles", *Proc. of the 1st Int. Geotechnical, Seminar on Deep Foundations on Bored and Augered Piles*, pp. 47-78.
4. Hong, W.P., Chai, S.G. (2007a), "Estimation of End Bearing Capacity of SDA Augered Piles on Various Bearing Stratum", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.5, pp.111-293 (In Korean).
5. Hong, W.P., Chai, S.G. (2007b), "Estimation of Frictional Capacity of SDA Augered Piles on Various Bearing Stratum", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27 No.4C, pp.279-292 (In Korean).
6. Hong, W.P., Lee, J.H., Chai, S.G. (2008), "Bearing Capacity of SDA Augered Piles in Various Grounds Depending on Water-Cement Ratio of Cement Milk", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.5, pp.37-54 (In Korean).
7. Kusakabe, O., Kakurai, M., Ueno, K. and Kurachi, Y. (1994), "Structural capacity of precast piles with grouted base", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.8, pp.1289-1305.
8. Lee, S., Park, J.H., Park, J.B., Kim, T.H. (2002), "A Study on the Characteristics of Bearing Capacity for SIP Piles in Domestic Areas", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.4, pp.319-327 (In Korean).
9. Paik, K.H. (1997), "Characteristics of the Bearing Capacity for New Auger-Drilled Piles", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.13, No.4, pp.25-36 (In Korean).
9. Paik, K.H., Yang, H.J. (2013), "Development of Steel Pile Attached PHC Piles for Increasing Base Load Capacity of Bored Pre-Cast Piles", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.8, pp.53-63 (In Korean).