

매입말뚝의 인발저항특성에 관한 연구

Analytical Study on the Pullout Resistance Characteristics of Bored Pile

박종배¹ · 천영수²

Jong-Bae Park¹ and Young-Soo Chun²

(Received July 29, 2016 / Revised September 15, 2016 / Accepted September 16, 2016)

요 약

압축 부재인 PHC 말뚝(직경 600mm)도 강선의 부착력을 높이면 83.6~91.6tonf의 극한 인장력에 대해 구조적으로 저항할 수 있는 것으로 실험결과 나타났다. 이러한 시험결과에 안전율을 고려하여 적절한 허용값을 제시하면 부상방지 앵커를 대체하거나 절감시킬 수 있는 것으로 기대되었다. 이를 위해서는 구조적 인장성능과 함께 실제 지반에 시공된 매입말뚝의 인발저항 거동이 규명되어야 한다.

본 연구에서는 현장에 시공된 실제 매입말뚝의 인발거동 특성을 파악하기 위하여 정적 인발재하시험을 실시하여 주면마찰력 산정식과 비교하였다. 또한, 간편하게 인발저항력을 평가하기 위하여 PDA를 이용한 동재하시험을 실시하여 정적 인발재하시험 결과와 비교하였다. 그 결과, 매입말뚝의 시멘트풀이 충분히 경화한 후인 15일 후에는 LH 주면마찰력 산정식의 마찰력과 정적인발재하시험결과가 잘 일치하였고 동재하시험에서 구한 마찰력 과도 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

주제어 : 인발저항력, 매입말뚝, 부력방지 앵커, 인발재하시험, 동재하시험, PHC 말뚝

ABSTRACT

Structural experiment result showed that PHC(d=600mm) Pile used as a common compression member could resist 83.6 ~ 91.6 tonf of ultimate tension force, if the adhesion of P.C. bar of PHC pile to the concrete foundation is strengthened. Considering a proper safety factor to ultimate tension strength, PHC pile can substitute the anti-floating anchor, or reduce the number of anchors. For this purpose, pullout resistance behavior of a Bored pile embedded in real ground as well as structural tension strength of PHC pile must be evaluated.

This study performed the static pullout tests to evaluate the pullout behavior of bored pile, and compared the test results with design value of side resistance. To evaluate the pullout resistance easily, static pullout test results were compared with dynamic loading test results using PDA. As a result, cement paste of the bored pile was hardened which is after 15 days, LH side resistance design value corresponded well to the Static pullout test results, also to the side resistance evaluated by dynamic loading test.

Key words : Pullout Resistance, Bored Pile, Anti-floating Anchor, Pullout Test, Dynamic Loading Test, PHC Pile

1. 서 론

구조물의 기초로 사용되는 말뚝은 압축하중을 받는 부재로 인식되고 있으나 최근에는 지하주차장 등의 부력이 발생하는 부위에서 부력방지앵커를 대체하여 인장부재로 사용하는 노력이 시도되고 있다. 서미정 외(2015)은 공동주택 기초로 많이 사용하는 PHC 말뚝의 P.C. 강봉에 썬기를 장착하여(그림 1 참조) 콘크리트 기초내에서의 정착력을 강화하면 P.C. 강봉이 인장력을 받으므로

PHC 말뚝도 인장부재로 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. 또한, 실험방법으로(그림 2 참조) 기초체 하부 말뚝 결합 부분에 지름 1,200mm의 홀이 가공된 강성 철판을 설치하고 기초체 상부 철판과 일체하여 하부철판 쪽에 H-beam을 설치하는 방식으로 반력 프레임을 구성하고, 말뚝 선단 쪽에 원형 철판을 용접하여 Tension bar를 이용하여 인장하는 방식을 적용하였다. PHC 말뚝에 대하여 직경별 인장역학실험을 실시하여 확인한 파괴인장하중은 표 1과 같다(토지주택연구원, 2014).

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(주저자: jbpark@lh.or.kr)

2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원(교신저자: cysoo@lh.or.kr)

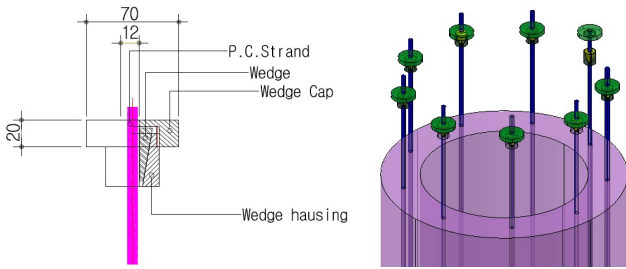
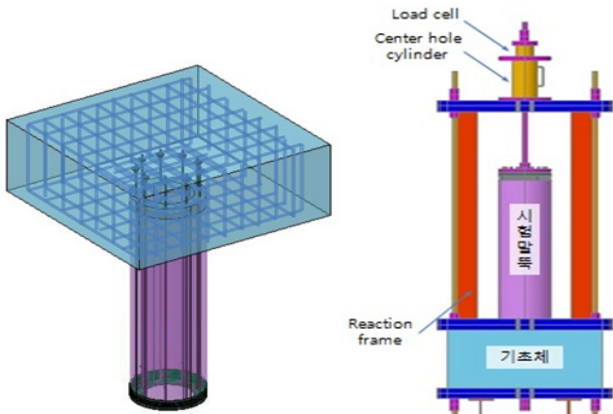


그림 1. PHC 말뚝의 P.C. 강봉에 쐐기 장착한 모습(토지주택연구원, 2014)



(a) PHC 말뚝과 기초판이 결합된 실험체 (b) 인장역학실험 모습

그림 2. PHC 말뚝과 기초판 결합체의 인장역학실험 개요도(토지주택연구원, 2014)

표 1에서 보면 PHC 450 말뚝은 510.4~684.1kN, PHC 500 말뚝은 601.8~787.8kN, PHC 600 말뚝은 820~899.1kN의 파괴인장하중을 나타내었다. PHC 600 말뚝은 안전율을 고려하면 500kN의 인발력을 지지할 수 있도록 설계되었는데, 부력방지 앵커의 통상 부력저항력을 500kN으로 설계하므로 구조물의 연직하중을 저항하기 위해 시공된 PHC 600 말뚝이 부력이 발생할 때는 부력방지 앵커의 역할도 충분히 할 수 있는 것으로 판단되었다. PHC 450 및 500 말뚝도 2~3본 정도면 부력방지 앵커를 대체할 수 있는 것으로 판단되었다. PHC 말뚝이 부력방지 앵커의 역할을 대체하기 위해서는 구조적인 인장특성 외에 말뚝이 시공된 지반의 인발저항력이 설계목표치를 상회해야 하고 또한 설계 및 품질확인 단계에서 인발력의 예측 및 확인이 용이해야 한다. 설계단계에서의 인발저항력 예측을 위해서 이론 고찰에서

표 1. PHC 말뚝과 기초판 결합체에 대한 인장역학실험 결과(토지주택연구원, 2014)

실험체 번호	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
PHC A종 말뚝직경(mm)	450		500		600		
P.C.강봉	D9.2 x 8ea		D9.2 x 9ea		D9.2 x 12ea		
최대인발하중 (tonf)	69.7	52.0	80.3	61.3	89.6	91.6	83.6
파단 P.C.강봉 수량(ea)	1	2	5	0	1	3	1
파괴 모드	P.C.강봉의 탄성한계 75~107% 수준에서 P.C.강봉이 파단되거나 인발됨. PHC말뚝과 콘크리트 표층의 박리가 발생됨.						

단말뚝과 군말뚝의 인발저항력을 산정하는 방법들을 정리하였다. 시공된 말뚝의 인발저항력을 확인하기 위한 품질시험방법으로는 정적 인발재하시험이 가장 정확하지만 시간과 비용이 많이 드는 문제가 있다. 최근에 말뚝의 품질관리 및 지지력 확인을 위하여 동재하시험이 보편적으로 시행되고 있는데 동재하시험은 선단지지력과 마찰지지력을 분리하여 해석할 수 있으므로 동재하시험의 마찰지지력과 인발저항력 사이의 상관성이 규명되면 간편한 동재하시험으로도 현장 말뚝에 대한 인발저항력 확인이 가능할 것으로 판단되었다(토지주택연구원, 2014).

이에 본 논문에서는 LH 평택 현장 3개소 위치에 매입말뚝을 각각 2본씩 시공하여 시공시 동재하시험(E.O.I.D PDA Test), 재향타 동재하시험(Restrike PDA Test) 및 정적 인발재하시험을 실시하여 각 시험방법에 따른 주면마찰력의 크기를 비교/분석하여 동재하시험으로도 매입말뚝의 인발저항력을 측정할 수 있는지 규명하고자 하였다(토지주택연구원, 2014).

2. 이론고찰

2.1 단말뚝의 인발저항력

단말뚝의 허용인발저항력은 축방향 압축력을 받는 말뚝의 극한주면마찰력에 안전율을 적용하여 허용인발하중을 구한 후 여기에 말뚝의 무게를 더한 값으로 하되 이 값과 말뚝재료의 허용인장하중을 비교하여 작은 값으로 결정한다. 이때 말뚝의 무게는 무시할 수 있다. 지반의 축방향 허용인발저항력을 구하는 방법에는 인발정재하시험을 실시하는 방법, 압축정재하시험에 의한 방법, 산정식에 의한 방법 등이 있으며, 가장 정확한 방법은 인발정재하시험을 실시하는 것이다. 극한인발저항력을 인발정재하시험으로부터 구할 수 없을 때에는 압축정재하시험에서 구한 극한주면마찰력을 바탕으로 극한인발저항력을 판정할 수 있는데, 그림 3의 압축방향의 재하시험과 인발재하시험결과 상관관계를 참고할 수 있다. 그림에서 보면 인발시의 주면마찰력은 압입시와 다르게 되는데, 사질토에서는 인발시의 주면마찰력이 압입시 값의 2/3 정도가 되고 점성토에서는 두 값이 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서, 압축정재하시험에서 구한 극한주면마찰력으로 인발저항력을 산정할 경우는 지반 종류 및 상태에 따라 적절한 감소계수를 적용할 필요가 있다(조천환, 2010).

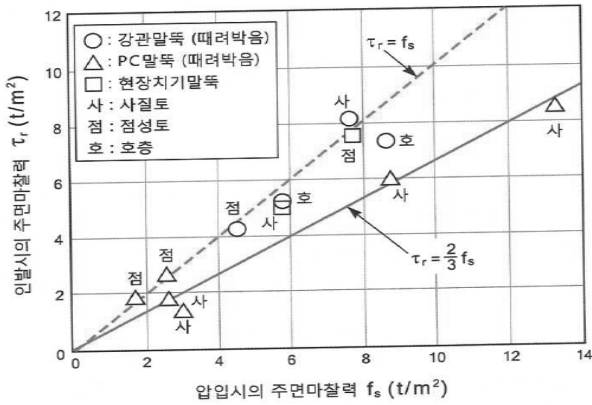


그림 3. 압입시와 인발시의 주면마찰력 관계(조천환, 2010)

여기서, L : 말뚝의 길이

L_{cr} : 말뚝의 한계근입길이(= $\lambda_{cr} D$)

$\lambda_{cr} = 0.2D_r - 8 : D_r < 95\%$

$\lambda_{cr} = 11.0 : D_r \geq 95\%$

D_r : 상대밀도

c_a : 점성토와 말뚝 사이의 마찰력

p : 말뚝의 윤변

γ : 흙의 유효단위중량

K_u : 인발계수(그림 4 참조)

K_{cl} : 인발보정계수(그림 5 참조)

δ : 말뚝과 흙의 마찰각

산정식에 의해 단말뚝의 인발저항력을 구하는 방법 중 하나로 다음 식이 있다.

$$T_{us} = P[T_C L_C + T_S L_S] + W \quad \text{식 1) (조천환, 2010)}$$

여기서, P : 말뚝의 윤변

T_C : 점성토층의 말뚝의 극한인발저항력
(압입시 극한마찰력과 동일하게 산정)

L_C : 점토층의 말뚝의 길이

T_S : 사질토층의 말뚝의 극한인발저항력
(압입시 극한마찰력의 2/3로 산정)

L_S : 사질토층의 말뚝의 길이

W : 말뚝의 유효 자중(무시할 수 있음)

식 1에서 T_C 와 T_S 는 인발재하시험으로 구할 수 있지만 그렇지 못한 경우는 압축재하시험(정재하시험 또는 동재하시험)이나 식 9)의 마찰력산정식을 통해서 구할 수 있다. 한편, 이외의 인발저항력 산정식에는 Meyerhof 등(1968), Das 등(1977), Chattopadhyay 등(1986) 등이 제안한 방법이 있다. Das(1977)의 식을 기본으로 점성토에 대한 마찰력 (C_a)을 조합하고 모형실험 후 인발보정계수(K_{cl})를 도입하여 매입 단말뚝의 인발저항력 (T_{us})을 산정하는 식을 다음과 같이 제안하였다(조천환, 2010).

$L < L_{cr}$ 인 경우

$$T_{us} = K_{cl} p [L c_a + \frac{1}{2} \gamma L^2 K_u \tan \delta] \quad \text{식 2) (조천환, 2010)}$$

$L \geq L_{cr}$ 인 경우

$$T_{us} = K_{cl} p [L c_a + \frac{1}{2} \gamma L_{cr}^2 K_u \tan \delta + \gamma L_{cr} K_u \tan \delta (L - L_{cr})] \quad \text{식 3) (조천환, 2010)}$$

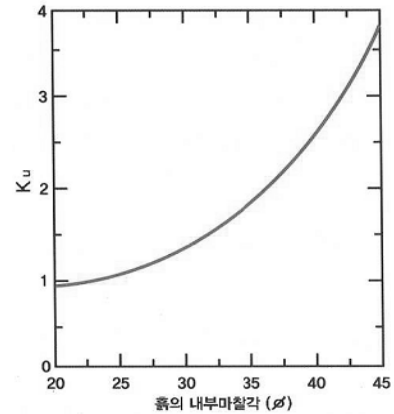


그림 4. K_u 와 ϕ 의 관계(조천환, 2010)

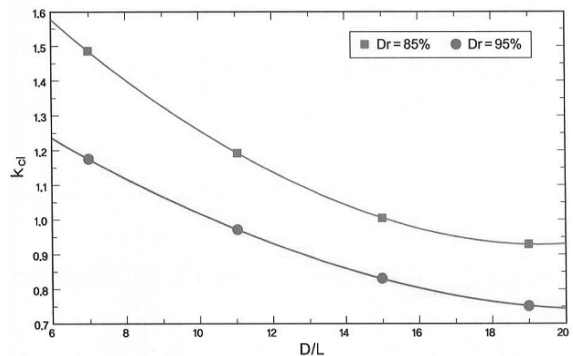


그림 5. 인발보정계수(K_{cl})(조천환, 2010)

말뚝의 허용인발저항력을 구하기 위한 안전율은 표 2와 같다.

표 2. 허용인발저항력 산정시 적용 안전율(조천환, 2010)

평상시	극한 : 3.0 이상, 항복 : 2.0 이상
지진시	2.0 이상

2.2 인발저항력 산정식(균말뚝)

균말뚝의 인발저항력은 흙의 종류에 따라 다음과 같이 두 가

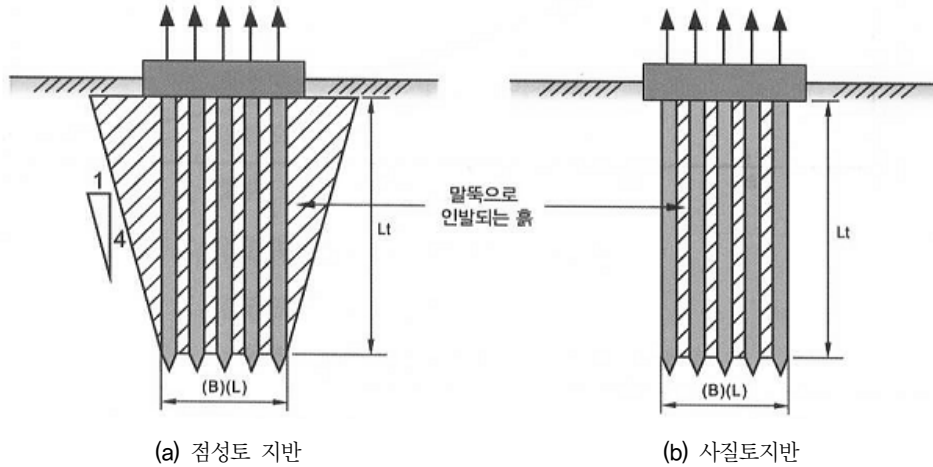


그림 6. 군말뚝의 인발저항력 추정(한국지반공학회, 2009)

지 경우로 나누어 결정한다.

1) 사질토의 경우에는 아래의 두 가지 중에서 작은 값으로 선택한다(한국지반공학회, 2009).

- ① 군말뚝을 이룬 각 말뚝의 단말뚝으로서의 허용인발저항력(단말뚝의 허용인발저항력 * 말뚝개수)
- ② 그림 6(a)에서 빗금으로 표시된 부분의 무게

2) 점성토 지반의 경우에는 다음의 두 가지 중에서 작은 값으로 선택한다(한국지반공학회, 2009).

- ① 군말뚝을 이룬 각 말뚝의 단말뚝으로서의 허용인발저항력의 합(단말뚝의 허용인발저항력 * 말뚝개수)
- ② $T_u = H(B+L)\bar{c}_u + W$ 식 4) (한국지반공학회, 2009)

여기서, T_u : 군말뚝의 극한인발저항력
 H : 말뚝머리 아래의 군말뚝 길이
 \bar{c}_u : 점착력의 평균 값
 W : 말뚝, 말뚝 캡, 군말뚝에 포함된 흙 무게의 합
 B : 군말뚝의 작은 폭
 L : 군말뚝의 큰 폭

* 허용인발저항력을 구하기 위한 안전율로서는 단기하중일 때 2.0, 장기하중일 때 3.0을 사용한다.

$$Q_{sa} = \frac{1}{3} [(0.2\overline{N_{\text{모래}}}' L_{\text{모래}} + 0.5\overline{q_{u\text{점토}}}) \times L_p]$$

식 5) (토지주택연구원, 2014)

$\overline{N_{\text{모래}}}'$: 사질지반의 수정평균 N 값,
 $0.2\overline{N_{\text{모래}}}' \leq 10tf/m^2$

$L_{\text{모래}}$: 모래층의 깊이
 $\overline{q_{u\text{점토}}}$: 점토층의 평균일축압축강도
 $= 1.25\overline{N_{\text{점토}}}' \leq 10tf/m^2$

$L_{\text{점토}}$: 점토층의 깊이
 L_p : 말뚝의 둘레 = πD

2.3 말뚝의 압축 마찰저항력

말뚝의 압축마찰지력으로부터 인발저항력을 추정하는 방법이 실무적으로는 더욱 유용할 수 있다. 현재 국내에서 풍화토 및 풍화암 정도 지반에 근입된 항타말뚝 및 매입말뚝의 지지력 설계 시 사용하고 있는 방법은 Meyerhof가 1976년도에 제안한 방법을 근간하여 다음 식을 사용하고 있다(토지주택연구원, 2014).

과거에는 구조물기초설계기준 등을 포함하여 국내의 매입말뚝 마찰지력식은 항타말뚝과 일본의 매입말뚝 식에 비해 50% 작게 설계하였다. 이는 도입초기에 매입말뚝의 시멘트풀 배합비에 대한 정립이 되지 않았고 이로 인해 시공품질에 대한 확신이 없었기 때문이었다. 일본의 경우 선단근고액은 물시멘트비 70%를 주면고정액은 150%로 이원화하였으나 국내와 일본의 시공여건이 틀리고 현실적으로 시멘트풀을 이원화하는 것이 어렵기 때문에 LH 공사는 시멘트 페이스트를 물시멘트비 83%로 일원화하여 주면에서 높은 마찰지력을 얻을 수 있었다(토지주택연구원, 2016). 따라서 항타말뚝과 같은 설계식의 사용이 가능하였고 72본의 정재하시험과 188회의 동재하시험 결과를 분석하여 이를 확인하였다(토지주택연구원, 2014).

그림 7 및 그림 8에서 동재하 및 정재하시험에서 구한 극한단위주면지지력은 평균 9.1tf/m²과 10.45tf/m²으로 나타나 항타말뚝의 설계기준값과 유사하였다. 설계식의 제안을 위해서는 N 값과 마찰지력의 관계식을 정리한 결과는 그림 9와 같다. 그림에서 N 값과 극한단위지지력 사이에는 $q_s = 0.28N + 0.975$ 의 관계가 성립되는 것으로 나타났으며, 이 값은 항타말뚝의 지지력식 0.2N 보다도 큰 값이다. 그림에서 보면 $q_s = 0.28N + 0.975$ 식을 사용할 때 상당량의 말뚝의 마찰지력이 식을 만족하지 못하므로 매입말뚝의 안전성을 고려하여 $q_s = 0.2N$ 으로 주면지지력을 계산하는 것이 타당한 것으로 판단되었다(토지주택연구원, 2014).

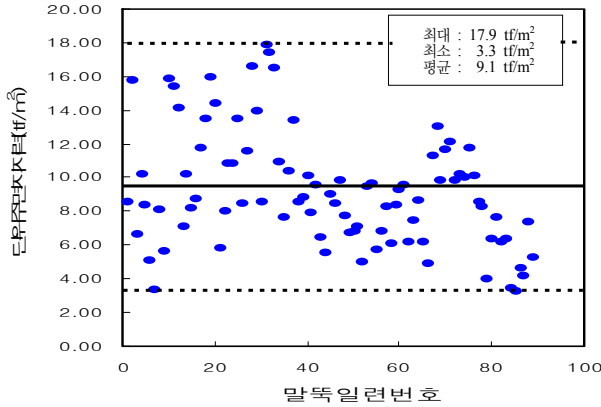


그림 7. 매입말뚝 마찰지력(동재하시험결과)
(박종배 등, 2004)

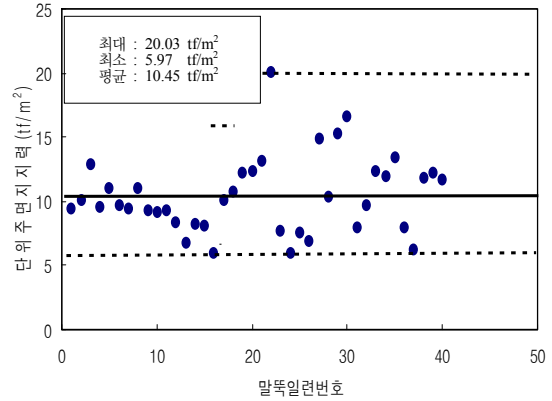


그림 8. 매입말뚝 마찰지력(정재하시험결과)
(박종배 등, 2004)

표 3. 시험말뚝 시공 및 시험 일정표(토지주택연구원, 2014)

시험말뚝		관입깊이 (m)	시공 일자	동재하시험 일시		인발재하시험 일시
				E.O.I.D	Restrike	
Test-1	T1-1	13.2	2014. 3. 11	2014. 3. 11	-	2014. 3. 19
	T1-2			-	2014. 3. 18	-
Test-2	T2-1	14.1	2014. 3. 12	2014. 3. 12	-	2014. 3. 27*
	T2-2			-	2014. 3. 18	-
Test-3	T3-1	11.9	2014. 3. 12	2014. 3. 12	-	2014. 3. 27*
	T3-2			-	2014. 3. 18	-

주1) Test-1의 경우 인발재하시험용 말뚝인 T1-1에 시공시 동재하시험(E.O.I.D)을 실시하였으며, 재항타시험(Restrike)은 인접한(약1.5m 이격) 말뚝(T1-2, 시공상태 동일)에 실시

주2) Test-2, Test-3 말뚝은 인발재하시험용 말뚝에 인접(약1.5m 이격)하여 시공한 T2-2 및 T3-2 말뚝에 동재하시험(E.O.I.D 및 Restrike)을 실시

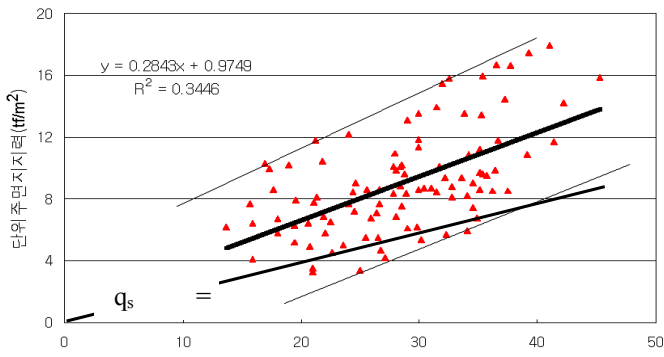


그림 9. 매입말뚝의 N값과 극한단위주면지력과의 관계(박종배 등, 2004)

3. 현장 인발시험

본 시험은 매입공법으로 시공되는 PHC말뚝의 정밀한 주면마찰력 평가를 위해 LH 평택 소사별 현장내 3개소 위치에 시험용 말뚝을 각각 2분씩 시공하여 시공시 동재하시험(E.O.I.D PDA Test), 재항타 동재하시험(Restrike PDA Test) 및 정적 인발재하시험을 실시하여 각 시험방법에 따른 주면마찰력의 크기를 비교

분석하고 매입말뚝의 인발저항력을 정량적으로 평가하고자 하였다(토지주택연구원, 2014). 시험말뚝들의 시공일자, 시험내용 및 시험일자 등을 정리하면 표 3과 같으며, 수행된 총 시험수량은 동재하시험 6회 인발재하시험 3회이다.

인발력을 측정하기 위해서는 현장에서 정적 인발재하시험을 실시하는 것이 가장 정확하지만 시간과 비용이 많이 드는 문제가 있다. 국내는 말뚝의 압축지력을 평가하기 위하여 동재하시험을 실시하는 것을 표준화하고 있는데 동재하시험에서 측정된 마찰지력이 신뢰성이 있으면 간편한 동재하시험으로 인발저항력을 산정할 수 있을 것이다. 따라서, 본 시험에서는 동일한 위치에서 정적인발재하시험과 동재하시험을 실시하여 그 결과값을 비교함으로써 말뚝의 인발저항력을 구하는데 동재하시험 결과를 활용할 수 있을 지에 대해서도 검토하는 것을 목적으로 한다(토지주택연구원, 2014).

3.1 시험말뚝 시공

시험말뚝 6본은 당 현장의 사용말뚝 시공영역에 인접하여 별도로 시공하였으며, 시공방법은 현장에서 적용중인 DRA(Donut

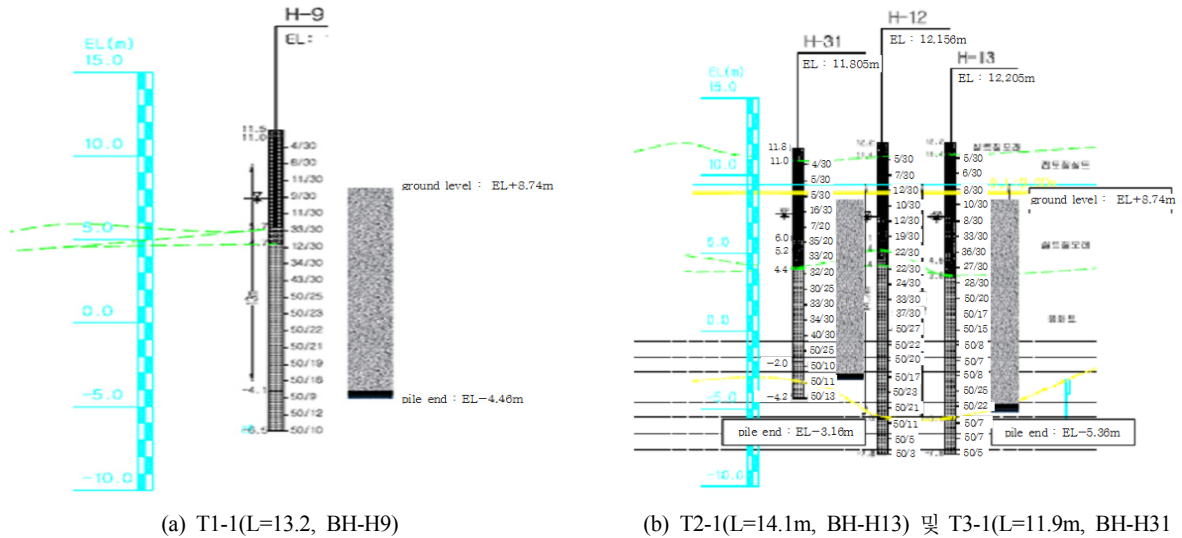


그림 10. 지반 주상도(토지주택연구원, 2014)

표 4. 동재하시험 결과(토지주택연구원, 2014)

시험말뚝 번호	관입깊이 (m)	시험 종류	CAPWAP 분석결과(tonf)			비고	
			주면마찰력	선단지지력	전체지지력		
Test-1	T1-1	13.2	E.O.I.D	15.7	219.7	235.5	시공 후 6일 경과
	T1-2		Restrike	100.9	207.9	308.8	
Test-2	T2-2	14.1	E.O.I.D	14.8	187.8	202.6	시공 후 7일 경과
			Restrike	100.9	201.0	301.9	
Test-3	T3-2	11.9	E.O.I.D	15.3	199.0	214.3	시공 후 7일 경과
			Restrike	83.8	194.8	278.6	

Rotary Auger)공법으로 수행하였다. 정적인발시험용 말뚝의 주면마찰력이 크게 발현될 경우 말뚝재료의 허용인장하중 보다 크게 나타날 수 있으므로 보다 정확한 주면마찰력을 측정하기 위해 말뚝선단에 Pulling Plate를 용접하고 Tension Bar(φ65mm)를 연결하였다. 인발시험용 말뚝에 바로 인접하여 동일한 시공 상태로 1분을 각각 추가 시공하여 동재하시험을 실시하고 인발시험용 말뚝과 주면마찰력을 비교토록 계획하였다(토지주택연구원, 2014).

3.2 지반조건

그림 10에는 각각의 시험말뚝이 시공된 위치의 근접 지반조건을 도시하였다. 시공당시의 지반고 EL+8.7을 고려할 때 시험말뚝들은 공히 조밀한 풍화토층에 안착되어 있는 것으로 나타났다(토지주택연구원, 2014).

3.3 정적 인발재하시험

정적 인발재하시험은 ASTM D 36891) 규정에 의해 아래 그림 11과 같이 지반반력을 이용하여 수행하였다. 최대인발하중은

140tonf으로 급속재하시험방법(Quick Load Test Method)에 의해 매 단계 10tonf을 기준으로 재하하고 각 하중단계에서 10~15분간 재하하중을 유지하였다. 최대인발하중 조건에서 말뚝자체의 재료적 인장파괴를 방지하기 위하여 시험말뚝의 선단부에 가압지지용 Pulling plate를 설치하고 이 plate에 tension bar를 연결하여 상부에서의 재하하중 가압이 말뚝머리 인발조건이 아닌 말뚝선단으로부터의 압축형 인발재하시험이 되도록 설치하여 시험을 수행하였다(토지주택연구원, 2014). 그 결과 말뚝재료의 파손이나 파괴 없이 성공적으로 인발재하시험을 수행할 수 있었다(그림 12 참조).

4. 시험결과 및 분석

4.1 동재하시험 결과

매입말뚝의 시멘트풀이 굳기 전에 실시한 초기동재하시험(E.O.I.D)과 시멘트풀이 굳고 난 후에 실시한 재항타동재하시험(Restrike) 결과는 표 4와 같다.

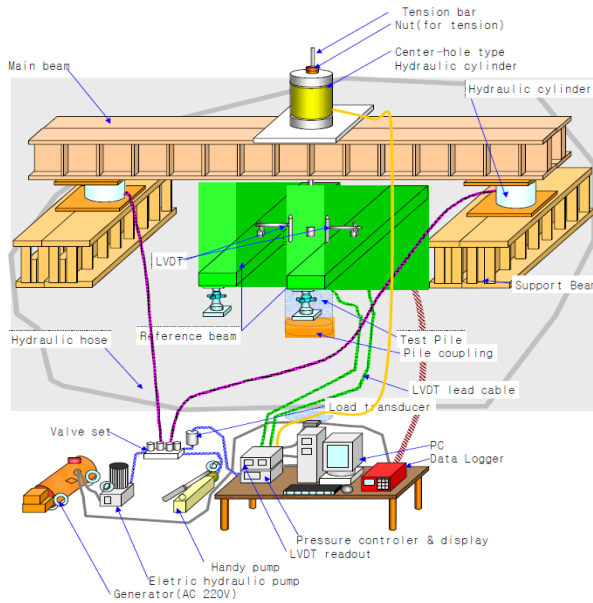


그림 11. 인발시험 장치도(토지주택연구원, 2014)

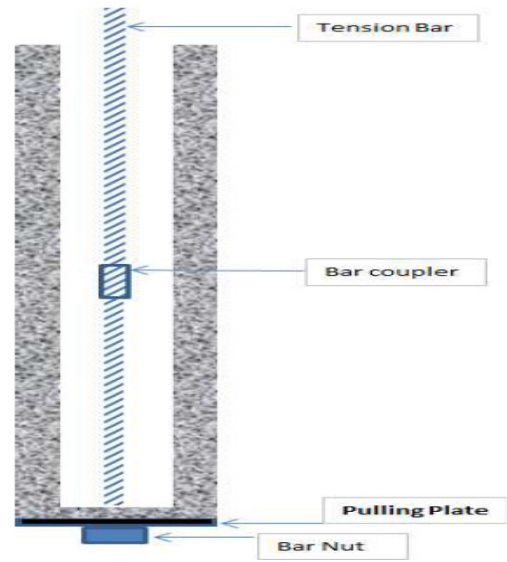


그림 12. 시험말뚝 모식도(토지주택연구원, 2014)

표 5. 인발재하시험 결과종합(토지주택연구원, 2014)

시험번호	극한인발저항력 (tonf)	최대변위(mm)	극한단위주면마찰력 (tonf/m ²)	허용인발저항력 (FS:3.0, tonf)
T1-1	105	43.66	5.63	35.3
T2-1	136	17.81	6.82	45.3
T3-1	135	24.19	8.02	45.0

표 4에서 보는 바와 같이 주입된 시멘트풀의 양생에 따른 지지력의 시간경과효과에 의해 주면마찰력의 증가현상이 발생하였음을 볼 수 있으며, 양생기간 약 1주일 경과조건에서 약 5~6배의 주면마찰력이 증가된 것으로 분석되었다. 시험시점에서의 양생효과가 고려된 주면지지력을 단위지지력으로 산정하면 약 5.0~7.0tonf/m²로 분석되었으며 이 값을 기반조건과 비교해볼 때 아직 최대 극한주면마찰력에는 미치지 않는 것으로 추정된다. 이 같은 분석은 약 1주일의 추가 경과조건에서 수행한 정적인발재하시험의 극한주면마찰력과 비교할 때 아직 시멘트풀의 양생효과가 충분히 발휘되지 않은 상태에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, 선단지지력의 경우는 시험말뚝 사이에 다소의 차이는 있으나 시공 중 측정값과 재항타시험에서의 값이 유사하게 나타났으며 단위선단지지력으로 환산하면 1,180~1,380 tonf/m²로 해석되어 견고한 지지층에 말뚝선단이 안착되어 있는 상태인 것으로 나타났다. 정적 인발재하시험을 수행한 말뚝에 대해서는 항타에너지에 의한 주면마찰력 감소현상을 우려/방지하기 위하여 바로 인접한 동일조건의 시험말뚝에 대해서만 재항타 동재하시험을 수행하였으며, 시험결과 중 Test-1 결과에 대한 동재하시험 성과를 예로 그림 13에 도시하였다(토지주택연구원, 2014).

4.2 정적 인발재하시험 결과

표 3에 설명되어 있는 바와 같이 인발재하시험은 각각의 시험말뚝에 대하여 시공 후 약 8일 경과(T1-1) 및 15일 경과(T2-1 및 T3-1) 조건에서 시험하였다. 시험시기가 상이한 것은 후술하는 내용과 같이 첫 번째 시험말뚝의 극한주면마찰력이 당초 예상하였던 극한값 대비 과소하게 측정됨에 따라 이는 주입된 시멘트풀의 충분한 양생이 되지 못한데 기인하는 것으로 판단하고 추가적인 양생효과를 평가하기 위하여 약 1주일의 양생기간을 추가한 후 시험을 수행하였다. 3개의 시험말뚝(T1-1, T2-1, T3-1)에 대한 인발재하시험 결과는 표 5 및 그림 13과 같다. 압축재하시험과는 달리 인발재하시험은 그림 13에서 보듯이 극한상태가 비교적 잘 나타났다. 시공 후 8일의 양생기간을 가진 T1-1 말뚝은 105tonf에서 인발되었으며, 양생기간 1주일이 추가된 T2-1 및 T3-1 말뚝은 각각 136 및 135tonf에서 인발되어 T2-1 및 T3-1 시험말뚝의 인발저항력은 추가적인 양생효과에 의하여 T1-1 시험말뚝의 극한주면마찰력 대비 약 30~40% 정도의 지지력 증가현상이 발생하는 것으로 나타났다. T2-1 및 T3-1 말뚝은 동일한 하중일 때의 변위거동이 매우 양호하게 변화되는 것으로

표 6. 동재하시험과 정적인발재하시험 결과의 비교(토지주택연구원, 2014)

시험 말뚝 번호	관입 깊이 (m)	정적인발시험 극한하중 (tonf)	동재하시험극한 마찰력 (tonf)	이론적 마찰력계산 (0.2N)	동재하 / 정재하 (%)	설계식 / 정재하 (%)	정적인발 시험시기	동재하 시험시기
Test-1	13.2	105 (5.6tf/m ²)	100.9 (5.4tf/m ²)	131.7 (7.8tf/m ²)	96	125	8일	6일
Test-2	14.1	136(30%) (6.8tf/m ²)	100.9 (5.1tf/m ²)	144.4 (7.9tf/m ²)	74	106	15일	7일
Test-3	11.9	135(30%) (8.0tf/m ²)	83.8 (5.0tf/m ²)	114.7 (7.4tf/m ²)	62	85	15일	7일

표 7. 신뢰성 높은 결과를 위한 동재하시험의 조건값(토지주택연구원, 2014)

시험말뚝 번호	관입 깊이 (m)	시험 종류	MQ	최종관입량 (mm)	CSB (MPa)	최대타격에 너지 (t.m)	선단전이 에너지 (t.m)	선단부 에너지전이율 (%)	평균단위 마찰력 (tf/m ²)
Test-1	T1-1	E.O.I.D	3.66	5	34.5	7.06	5.44	77	0.84
	T1-2		Restrike	1.12	4	30.4	4.83	1.15	24
Test-2	T2-2	E.O.I.D	2.81	6	25	3.83	2.63	69	0.74
		Restrike	1.32	1	25.6	3.65	0.86	24	5.06
Test-3	T3-2	E.O.I.D	3.59	6.5	28.7	6.01	4.18	70	0.91
		Restrike	1.12	2.5	30.1	5.84	2.2	38	4.98

나타났으며, 공히 인발변위량 약 10mm정도에서 항복과 극한현상이 복합적으로 거동하는 것을 볼 수 있다. 본 건 시험의 성과는 T2-1 및 T3-1 시험말뚝의 인발저항력을 기준으로 매입말뚝의 주면마찰력을 평가하는 것이 합리적이라고 판단되며, T1-1의 경우는 아직 주입된 시멘트풀의 양생효과가 충분치 않은 데에 나머지 말뚝과의 거동 차이가 발생한 것으로 판단된다(토지주택연구원, 2014).

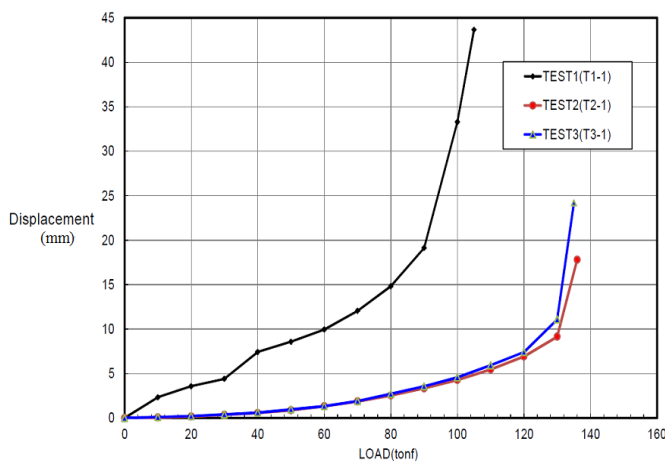


그림 13. 인발시험결과 하중-변위거동 비교(토지주택연구원, 2014)

4.3 재하시험(동재하 및 정적 인발재하) 및 설계식과의 비교분석

동재하시험에서 구한 마찰지지력과 인발재하시험에서 구한 인발저항력 및 마찰지지력을 구하기 위한 LH 마찰력 설계식 ($q_s = 0.2N$)과의 비교결과는 표 6과 같다.

표 6을 보면 시공 후 비슷한 시기에 실시한 동재하시험과 정적인발재하시험 결과를 비교한 결과 동재하/정재하 신뢰도가 96%로 매우 비슷한 것으로 나타났다. 하지만 충분한 양생을 위하여 정적인발시험을 시공 후 15일 후에 실시한 결과, 인발저항력이 약 30% 증가하였기 때문에 시공 후 7일 후에 실시한 동재하시험결과와 약 30%의 차이를 나타내었다. 또한, 매입말뚝에 대한 LH 마찰력 설계식공식($q_s = 0.2N$)에 의한 값을 비교한 결과, 시공후 8일의 시험값은 설계식에 비하여 25% 정도 작게 나타났고 15일 후에 실시한 시험값은 설계 마찰력 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다. 표 6의 결과를 종합해 보면 시공 후에 비슷한 시기에 실시한 동재하시험과 정적인발시험 결과가 유사하게 나타나 동재하시험으로도 매입말뚝의 인발저항력을 산정할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단되며, 동재하시험결과가 정적인발시험이나 이론식에 의한 값 보다 보수적이기 때문에 현장 품질확인용으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 동재하시험은 시험과 해석의 숙련도에 좌우되는 경향이 있고, 충분한 타격력이 주어져야 한다. 표 7에는 정적인발재하시험과 유사한 결과를 도출했을 때의 동재하시험의 조건 값들을 나타내었다(토지주

택연구원, 2014).

표 7에서 보면 동재하시험의 해석결과와 양호성을 판단하는 MQ(Match Quality)값이 주변마찰력이 발휘되는 Restrike 시험에서 2.0 이하의 값을 나타내고 있다. 통상적으로 MQ는 힘과 속도에 대한 파형 지수를 나타내며, 그 값이 3 이하이면 해석결과가 양호하다고 할 수 있고 이 값이 작으면 작을수록 양질의 해석결과를 제공하는 것이기 때문에 해석에 신경을 써서 MQ가 2이하로 하는 것이 좋을 것이다. 그리고 동재하시험은 충분한 타격력을 통하여 타격에너지가 선단부까지 전달되어야 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다. 간혹 매입말뚝에서 타격력이 약하면 시멘트풀의 경화에 따라 주변에서 타격력이 다 흡수되고 선단까지 전이된 에너지가 작으면 주변지지력을 충분히 유발시켰는지 확인하기 어렵다. 즉, 마찰지지력을 100% 다 산전하기 위해서는 충분한 타격력을 통하여 선단까지 충분한 에너지 파가 전달되어야 한다. 이를 확인할 수 있는 것이 표 7에서 보면 CSB(Compression Stress Bottom) 값이다. CSB는 말뚝 선단부의 최대 압축력을 말하며, 적은 시험으로 CSB값의 기준을 만들기는 어렵지만 위의 표를 보면 대략적으로 CSB값이 30MPa 정도가 되면 충분한 마찰력을 유발시키고 나서 선단부까지 에너지가 전이된 것으로 판단된다(토지주택연구원, 2014).

5. 결 론

- 1) LH 설계식의 마찰력과 정적인발재하시험의 인발저항력을 비교할 때, 8일 후의 시험값은 LH 설계값 보다 25% 정도 작게 나타나다가 15일 후의 시험값은 LH 설계값과 유사한 값을 나타내어 매입말뚝의 시멘트풀이 경화하여 설계

값을 나타내기 위해서는 15일 정도의 경화시간이 필요한 것으로 판단된다.

- 2) 현장에 시공된 말뚝의 인발저항력을 확인하는 방법으로 동재하시험의 마찰지지력과 비교 분석한 결과 정적인발재하시험과 비교적 일치하여 현장의 품질확인 방법으로 간편한 동재하시험을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 동재하시험을 통하여 매입말뚝의 인발저항력을 신뢰성 있게 유지하기 위해서는 MQ 값이 2이하가 될 수 있도록 하고, CSB 값이 30MPa 정도가 되게 하여 충분한 타격에너지가 말뚝에 전달될 수 있도록 하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 토지주택연구원에서 과제로 수행한 “말뚝의 축방향 설계 허용인발저항력 산정 및 상세 개발”의 연구결과와 일부를 정리한 것이다.

참고문헌

1. 토지주택연구원(2014), 「말뚝의 축방향 설계 허용인발저항력 산정 및 상세 개발」.
2. 한국지반공학회(2009), 「국토해양부제정 구조물 기초설계 기준 해설」.
3. 박종배, 김정수, 임해식(2004), “개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구”, 「한국지반환경공학회지」, 5(3): 5~15.
4. 조천환(2010), 「말뚝기초 실무」. 이엔지·북.
5. 서미정, 박종배, 박용부, 이종섭(2015), “파동방정식에 근거한 매입 말뚝의 동적 분석”. 「한국지반공학회논문집」, 31(11): 5~13.
6. 토지주택연구원(2016), 「한계상태설계법 시행에 따른 도로교 매입 말뚝의 설계기준 정립에 관한 연구(1)」.