

# 실트지반에 타입된 말뚝의 지지력 증가효과

## The Effect of Bearing Capacity Increasement for Driven Pile in Silt

여병철\* · 오세욱\*\* · 배우석\*\*\* · 안병철\*\*\*\*

Yeo, Byung Chul · Oh, Se Wook · Bae, Woo Seok · Ahn, Byung Chul

### Abstract

Recently, for the design of pile foundations on the soft ground condition, it is recognized that set-up effects are another important factor which influence the characteristics of bearing capacity of pile. In this paper, the thirteen dynamic pile loading tests were performed at the two different construction sites and the end of initial driving(EOID) were also performed and then restrike tests were performed after certain time lag.

The H-pile, pipe pile, PHC pile are installed by driving into the loose silty soil and then restrike tests were performed. Nine days after pile driving, the bearing capacity of H and pipe pile were increased whereas there is not bearing capacity increasement with PHC pile.

When the dense silty soil, the restrike test results showed that the bearing capacity of H and pipe pile increased up to 1.17 times. The 1-st and 2-nd restrike tests performed after 6 and 12 day, respectively. The results showed that the bearing capacity of PHC pile was decreased but the bearing capacity of piles were increased up to 1.38 times after 13 days with the third restrike test.

**Keywords** : Pile foundation, H-pile, Bearing capacity increasement, End of initial driving, Restrike

### 요 지

최근 연약지반상의 말뚝기초설계에 있어서 경시효과는 말뚝의 지지력 특성을 나타내는 중요한 요소 중의 하나로 인식되고 있다. 본 논문에서는 이러한 지지력 증가효과를 연구하기 위해 두 곳의 현장에서 13개의 말뚝에 대해, 항타시 EOID(초기 동재하시험)을 실시한 후 일정한 시간이 경과한 다음 재항타시험을 수행하였다.

느슨한 실트지반에 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝을 항타에 의해 설치하고 9일 후 재항타 한 결과 H말뚝, 강관말뚝의 경우 지지력이 증가된 반면, PHC말뚝은 지지력의 증가가 거의 없는 것으로 나타났다. 7일 후 재항타시험을 수행한 결과 단단한 실트지반의 경우 H말뚝과 강관말뚝은 지지력이 1.17배 증가하였다. 그러나 PHC말뚝의 경우 6일 후 수행한 제 1차 재항타시험에서는 지지력이 감소하였다가, 13일 후 수행한 3차 재항타시험에서는 지지력이 1.38배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

**주요어** : 말뚝기초설계, H말뚝, 지지력 증가, EOID, 재항타시험

\* 정회원 · 삼표산업 환경연구원 전무이사

\*\* 정회원 · 한양건설 기술연구소

\*\*\* 정회원 · 청주대학교 겸임교수

\*\*\*\* 정회원 · 충북대학교 박사수료

## 1. 서론

말뚝기초는 일반적으로 가장 많이 사용하고 있는 기초형식 중의 하나로 말뚝의 지지력은 지반의 전단특성, 흙의 구조 및 입자의 구성성분, 지반내의 응력조건 등 다양한 지반 조건과 말뚝의 형상, 크기, 재질, 설치방법 등 말뚝의 특성 및 말뚝설치 후의 시간경과효과 등 다양한 요소의 영향을 받는다.

말뚝을 항타한 후 시간이 경과함에 따라 지지력이 변화하는 시간경과효과에 대한 연구는 최근의 말뚝기초설계와 시공에 있어 가장 두드러진 변화이다. 최근 들어 국내에서도 시간경과효과(time effect)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 항타 후 시간이 경과하면 지지력이 증가하는 경우가 많이 있다고 발표되고 있다. 시간경과에 따른 지지력의 증가는 주로 주면마찰력의 증가이며 선단지지력은 거의 변화가 없다. 그러나 시간이 경과해도 지지력이 증가하지 않는 지반조건이나 지지력이 감소하는 경우도 조사되었다.

특히, 많은 연구자(Mitchell, 1960; Tavensas 등, 1972; Skov R 등, 1988; Svinikin, 1996; Paikowsky, 1996)들에 의하면 점성토 지반의 경우 항타 후 지지력은 상당한 시간에 걸쳐 증가하게 되지만, 사질토 지반의 경우 과잉 간극 수압의 소산에 긴 시간이 걸리지 않아 지지력의 증가도 상대적으로 급속히 이루어진다고 연구되었다.

사질토 지반에서는 시간경과효과를 고려하지 않는 것이 일반적으로 받아 들여져 왔으나 최근들어 사질토 지반에서도 과잉 간극 수압의 소산이후 시간경과효과 등에 의한 지지력 증가현상이 연구되었다. 최근 들어 국내에서도 천, 조 등에 의해 시간경과에 따른 타입말뚝의 지지력 증가현상이 7일 이내에 나타나는 것으로 보고되었다(천병식, 조천환, 1998).

반면에 시간경과에 따라 지지력이 감소되는 현상은 Parsons에 의해 처음으로 연구되었다(Parsoss J.D., 1966). 말뚝의 Relaxation 현상은 혈압, 이암 등과 같은 판상형 풍화암에 말뚝이 관입되었을 때 나타나는 것으로 알려지고 있으며, 또한 포화된 조밀 세사지반에서 일어날 수 있는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 고강도 H말뚝의 지지력 특성을 연구하기 위해 PHC말뚝, 강관말뚝과 함께 2개 현장에 총 13개의

말뚝을 시공하여 지지력 특성을 비교·분석하였고, 항타시 초기 동재하시험(EOID)을 실시한 후 일정한 시간이 경과한 다음 재항타시험을 수행하였다.

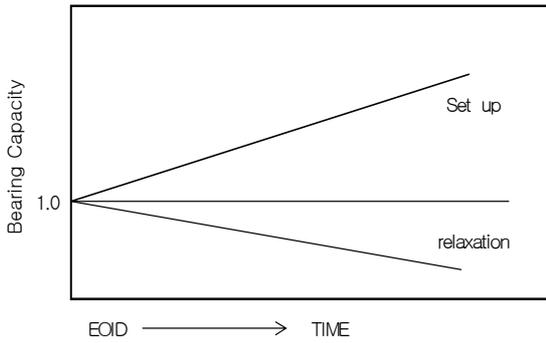
## 2. 지지력 증가효과

시간이 경과함에 따라 지지력이 증가하는 set-up 효과는 말뚝기초를 설계하고 시공·관리하는데 큰 영향을 미친다. 이러한 효과를 효율적으로 설계에 반영한다면 경제적인 설계가 될 뿐 아니라 말뚝기초 시공시 무리한 항타를 방지할 수 있어 안전한 말뚝시공을 유도할 수 있다는 장점이 있다.

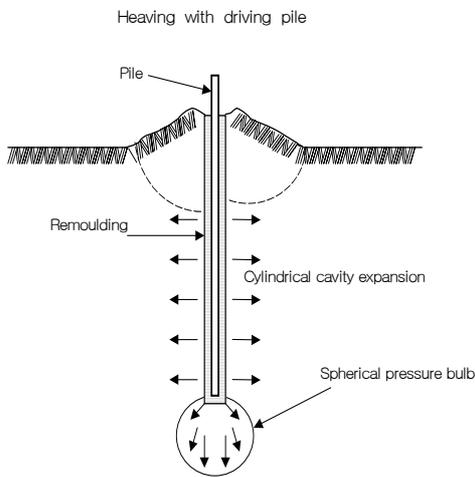
반면 이러한 효과를 적절하게 고려하지 못할 경우에는 시공과정이 매우 어려운 조건이 되거나 불필요한 과잉시공이 되어 말뚝재료의 손상 또는 공사비의 낭비, 더 나아가서는 말뚝기초의 부실화까지도 초래할 수 있다.

한편 시간경과에 따라 말뚝지지력이 감소하는 Relaxation이 발생하는 지반조건을 확인하지 않고 시공을 할 경우 말뚝기초의 파괴 등 심각한 문제가 발생할 수 있다. 특히, 시간경과효과를 고려하지 않은 상태에서 항타공식을 단순 적용하여 콘크리트말뚝의 재료가 파손된 시공사례가 발견되고 있다.

말뚝이 관입되면 말뚝선단부 부근에서는 구형압력구조(spherical pressure bulb)가 형성되며 말뚝주면부에서는 원통형 공동확장과 유사한 지반거동을 유발시킨다. 이때 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 말뚝 주면부와 인접한 빗금친 부분에서는 극심한 지반교란이 발생하며 흙구조는 재성형 상태에 도달하게 된다. 이와 동시에 말뚝관입 및 항타로 인한 지반진동 등의 영향으로 간극수계에도 격심한 변화가 유발되어 상당히 큰 과잉 간극 수압이 발생한다.



(a) 시간경과-지지력 곡선



(b) 말뚝 항타시 지반교란

그림 1. 말뚝의 시간경과효과(Randolph, 1982)

### 3. 현장재하시험 방법

#### 3.1 지반조사 결과

그림 2는 각 지역의 지반조사 결과를 나타낸 것으로 Site I 은 지표면으로부터 모래질 실트층, 자갈질 모래층, 풍화토층, 풍화암층으로 지반이 형성되었다. 지층의 구성 상태로 보아 시험시공지역의 서쪽에 인접하여 하천이 흐르고 있어 퇴적된 것으로 추정되며 지하수위는 지표면으로부터 약 1.55m 지점에 위치하고 있다.

Site II는 지표면으로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 지반이 형성되어 있다. 이 지역은 한강의 하류와 인접한 구릉지역으로써 자갈 및 모래질 실트층으로 구성되어 있다. 지하수위는 지표면으로부터 약 1.3m 지점에 위치하고 있다.

#### 3.2 현장재하시험

고강도 H말뚝에 대하여 정재하시험과 동재하시험을 수행한 후 시간경과효과를 평가하기 위하여 2개 지역에 13 개의 말뚝을 시험시공하고 7톤 유압해머를 이용하여 정적·동적재하시험을 수행하였다. 현장재하시험에서 동재하시험은 항타분석기를 이용하였으며(ASTM D,1992), 재하시험시 측정된 데이터는 CAPWAP(1995) 방법을 이용하여 분석하고 여기서 얻은 하중-침하량 곡선은 Davisson 판정법을 적용하여 지지력 값을 결정하였다(Davisson, 1972).

표 1. 현장재하시험

Site	Pile			Dynamic load test(test No.)		Remark
	Type	Sectional dimension(mm)	Quantity(No.)	EOID	Restrike	
I	H Pile	H-200×204×12×12	2	2	2	High strength (SHK 490)
		H-244×252×11×11	2	2	2	
		H-294×302×12×12	2	2	2	
	Steel Pile	Φ406.4×9	1	1	1	Normal strength (SPS 400)
	PHC Pile	Φ400×65	1	1	1	PHC
II	H Pile	H-300×305×15×15	3	3	3	High strength (SHK 490)
	PHC Pile	Φ450×70	2	2	5	PHC
Total No.			13	13	16	-

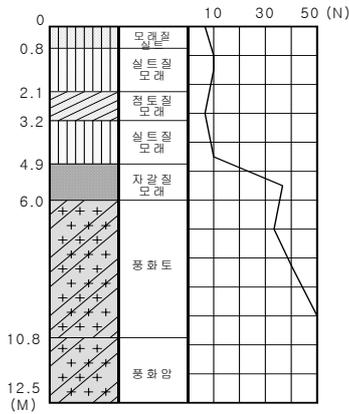
#### 4. 동재하시험 결과

고강도 H말뚝의 최적의 설계 시공을 위하여 시공시 이를 고려하여 항타하였고, 시간경과효과를 확인하기 위하여 동재하시험을 일정 시간별로 실시하였다.

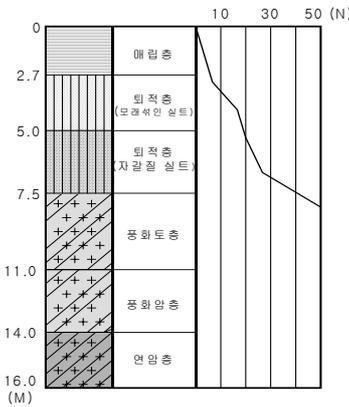
##### 4.1 느슨한 실트지반(Site I)

상부층이 느슨한 실트질 모래(N < 10이하)로 형성된 지반에서 시간경과에 따른 말뚝의 지지력 변화를 표 2에 나타내었다. 고강도 H말뚝(H1-6), 강관말뚝(P1-1), 기성 콘크리트말뚝(P1-2)을 풍화암층, 풍화암층 상단, 풍화토에 각각 말뚝을 시공하여 초기항타(EOID) 후 2일이 지난 다음 제 1차 재항타시험(restrike 1)을 실시한 결과 지지력이 각각 1.88, 1.35, 1.78배 증가하였고, 초기항타(EOID) 후 9일이 지난 다음 제 2차 재항타시험(2-nd restrike)에서는 지지력이 각각 2.13, 2.08, 1.85배 증가하였다. 일반적으로 시간경과효과에 의한 지지력 증가현상은 7일 이내에 나타나는 것으로 연구되었으나(이명환, 1994), 본 연구에서는 개단말뚝인 고강도 H말뚝(H1-6)과 강관말뚝(P1-1)의 경우 9일이 지난 후에도 지지력이 지속적으로 증가되는 반면에 폐단말뚝인 PHC말뚝(P1-2)의 경우 지지력의 증가가 미소한 것으로 나타났다.

그림 3에서는 재하시험 결과로부터 얻은 하중-침하량 곡선을 비교하였다. 시간경과에 의한 지지력 증가는 주로 항타시에 교란되었던 말뚝 주변부의 지반 강도가 회복하면서 발생하는 것으로 연구되었다. 그림 4(a)와 그림 4(c)에 나타난



(a) Site I



(b) Site II

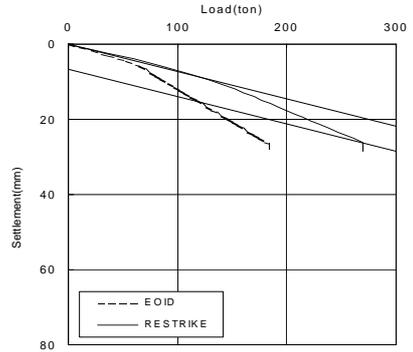
그림 2. 지반조사 결과

표 2. 느슨한 실트지반의 시간경과에 따른 지지력비(Site I)

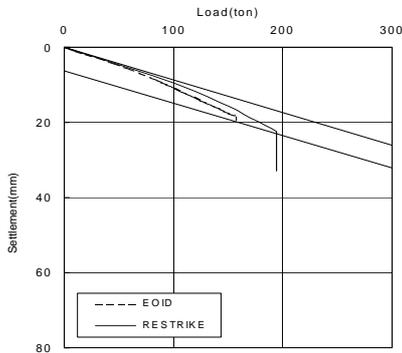
Pile No.	Sectional dimension(mm)	Bearing capacity ratio( $Q/Q_e$ ) <sup>주)</sup>		Elapsed time(days)		Penetration depth(m)
		1st restrike	2nd restrike	1st restrike	2nd restrike	
H1-1	H-200×204×12×12	1.24	-	9	-	10.7
H1-2		1.27	-	9	-	11.6
H1-3	H-244×252×11×11	1.54	-	9	-	11.5
H1-4		2.25	-	9	-	12.2
H1-5	H-294×302×12×12	1.40	-	9	-	11.9
H1-6		1.88	2.13 ↑	2	9	12.1
P1-1	Φ406.4×9	1.35	2.08 ↑	2	9	10.8
P1-2	Φ400×65	1.78	1.85	2	9	9.6

주)  $Q/Q_e = \frac{\text{재항타시 지지력}}{\text{초기항타시 지지력}}$

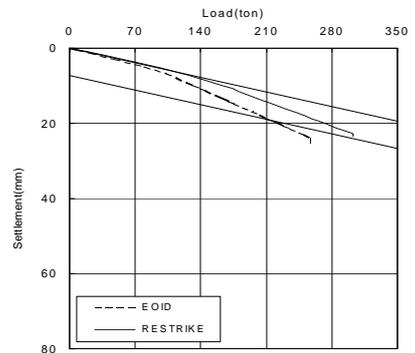
바와 같이 고강도 H말뚝과 PHC말뚝의 경우 제 1차 재항타시험시 대부분이 주변마찰력이 발생되어 제 2차 재항타 후 주변마찰력의 증가는 미미한 것으로 분석되었다. 강관 말뚝의 경우 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 제 1차 재항타 후 주변마찰력의 증가현상은 미미하나 제 2차 재항타시험 후 주변마찰력의 증가현상은 매우 크게 발생한 것으로 연구되었다. 또한 폐단말뚝인 기성콘크리트말뚝(PHC)은 2차 재항타시험에서 지지력의 증가가 H말뚝에 비해 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다(그림 3(g),(h)).



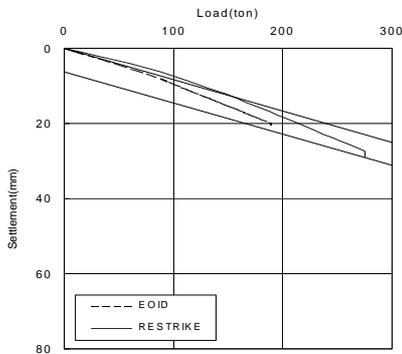
(d) H1-4



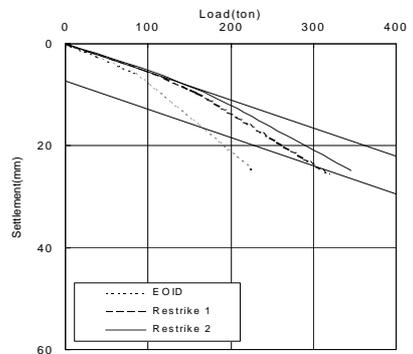
(a) H1-1



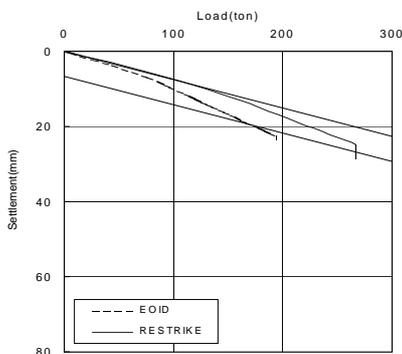
(e) H1-5



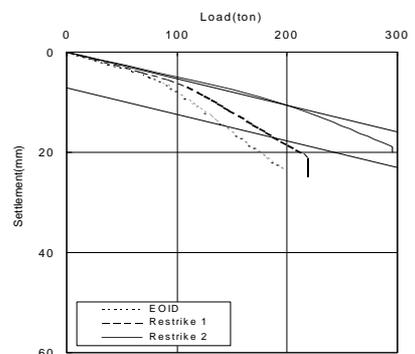
(b) H1-2



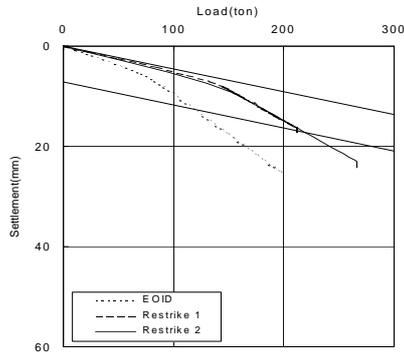
(f) H1-6



(c) H1-3

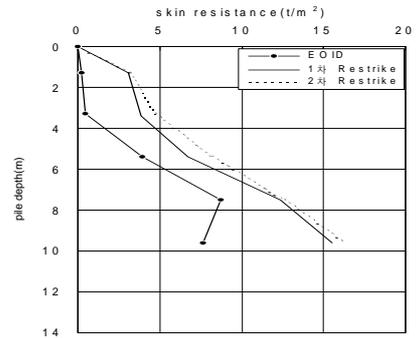


(g) P1-1



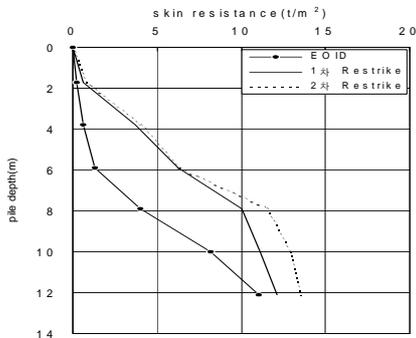
(h) P1-2

그림 3. 시간경과에 따른 하중-침하 곡선

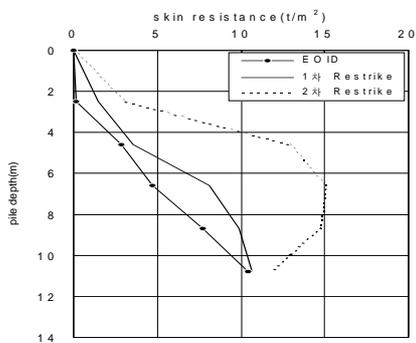


(c) P1-2

그림 4. 깊이에 따른 주변마찰력의 분포



(a) H1-6



(b) P1-1

표 3. 조밀한 지반의 시간경과에 따른 지지력시험 결과

Pile No.	Pile depth(m)	Sectional dimension(mm)	Method type	Dpth of driving (mm/打)	Davisson's method(ton)	Aging (day)
H2-1	13.8	H-300×305×15×15 (SHK490)	EOID	9.0	262	-
			Restrike	6.0	326 ↑	7
H2-2	14.1		EOID	5.0	324 ↑	-
			Restrike	4.0	369 ↑	7
P2-1	7.9	ø450×70	EOID	3.0	286 ↑	-
			Restrike 1	17.0	150	6
			Restrike 2	3.0	281	7

#### 4.2 단단한 실트지반(Site II)

그림 5와 그림 6은 초기항타와 7일 후 재항타시의 하중-침하 곡선을 나타낸 결과이다. 초기항타시 지지력은 각각 262 tonf, 324 tonf이었고, 1차 재항타시험 결과 326 tonf, 369 tonf으로 지지력 비는 1.24, 1.14배로 나타났다.

그림 7은 강관말뚝의 항타시험 결과를 나타낸 것이다. 하중-침하 곡선의 분석 결과 초기항타시 지지력은 286 tonf 이었고, 6일과 7일이 경과한 후 항타시험결과 지지력이 각각 150 tonf, 281 tonf으로 나타났다. 지지력 비는 각각 0.52배, 0.98배로 감소하였다. 재항타시 나타난 지지력의 감소현상(relaxation)은 사질토 및 비압축성의 굳은 점토지반에서 주로 발생하는데, 말뚝 타입시 말뚝의 체적만큼의 지반용기가 발생하여 지반의 밀도감소로 지지력이 감소하는 것으로 판단된다.

그림 8은 시간경과에 따른 지지력비( $Q/Q_e$ )의 변화를 보여주는 것으로 조밀한 지반에 비해 느슨한 지반의 지지력비가 큰 것으로 나타났으며, H말뚝의 지지력비가 원형말뚝의 지지력비에 비해 비교적 높은 것을 알 수 있다.

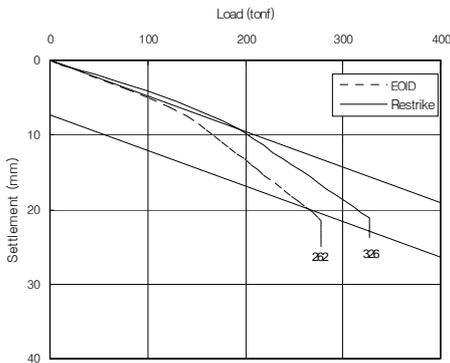


그림 5. 시간경과에 따른 하중-침하 곡선(H2-1)

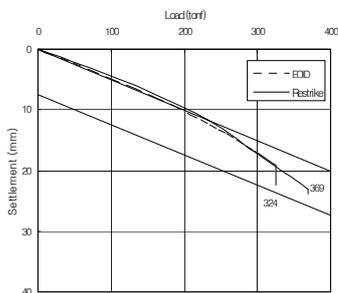


그림 6. 시간경과에 따른 하중-침하 곡선(H2-2)

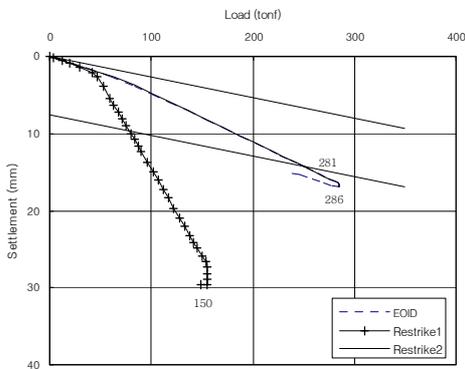


그림 7. 시간경과에 따른 하중-침하곡선(P2-1)

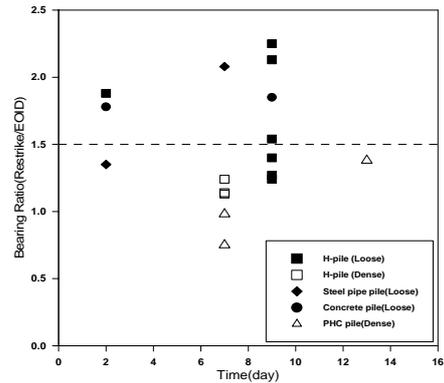


그림 8. 시간경과에 따른 지지력비의 변화

## 5. 결론

- (1) 느슨한 실트지반에 시간경과에 따른 지지력의 특성을 파악하기 위해 동일지반에 고강도H말뚝(H1-6), 강관말뚝(P1-1), 기성콘크리트말뚝(P1-2)을 시공하고 초기항타 후 2일이 지난 후 재항타를 수행한 결과 지지력이 각각 1.88, 1.35, 1.78배 증가하였고, 9일이 지난 후 2차 재항타한 결과 지지력이 각각 2.13, 2.08, 1.85배 증가하였다.
- (2) 느슨한 실트질 지반을 대상으로 선단지지력과 주변마찰력을 분석한 결과, 선단지지력에 비해 주변마찰력의 증가 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나, 각각 1.30배와 2.13배의 지지력 증가를 나타냈다. 이 결과로서, 시간이 지날수록 선단지지력에 비해 주변마찰력의 증가 경향이 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 전체지지력의 증가는 선단지지력 뿐만 아니라 주변마찰력의 증가에도 상당한 영향을 받는 것으로 판단된다.
- (3) 단단한 실트지반에 시간경과에 따른 지지력 특성을 조사하기 위해 H말뚝을 초기항타 후 7일이 지난 후 재항타시험을 실시한 결과 지지력이 평균 1.17배 증가하였으나, PHC말뚝의 경우 재항타 결과 초기항타에 비해 지지력이 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 비교적 단단한 토층 관입시 토사의 상향 이동으로 말뚝에 인장응력을 작용시키게 되는데, 이것이 지지력 감소에 기인한 것으로 판단된다.
- (4) 시간경과에 따른 지지력비( $Q/Q_e$ )는 동일한 형상의 말뚝에 있어서 조밀한 지반에 비해 느슨한 지반의 지지력비가 크게 나타났다. 또한 유사한 지반에서 H말뚝의 지지력비가 원형말뚝의 지지력비에 비해 높게 나타나, 향후 다양한 형상의 말뚝기초에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. (접수일자 : 2003년 2월 6일)

## 참 고 문 헌

1. 신방웅, 여병철(2000), 고강도H말뚝의 연직 지지력 특성, 한국지반공학회논문집, 제 16권, 제2호, pp. 135~143.
2. 천병식, 조찬환(1998), 항타H말뚝의 연직지지력 특성, 대한토목학회 논문집, 제 18권, 제3-3호, pp. 403~413.
3. Davisson, M. T.(1972), High Capacity Piles, Proceedings, Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, ASCE Illinois Section, Chicago, pp .55.
4. GRL Associates, Inc.(1995), CAPWAP User Manual.
5. Parsons J.D.(1966), Piling Difficulties in the New York Area, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol, 96, No. SM1, pp. 43~64.
6. Poulos, H.G. and Davis.(1980), Pile Foundation Analysis and Design, John wiley and sons, pp. 354~365.
7. Yang, N.C.(1970), Relaxation of Piles in Sand and Inorganic Silt, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM 2, pp. 395~409.
8. York, D.L., Brusey, W.G., Clemente, F.M. and Law, S.K.(1994), Set-up and Relaxation in Glacial Sand, Journal of Geotechnical Engineering. ASCE.