

## 재하시험에 의한 퇴적이암지반에 시공된 강관말뚝의 지지특성 연구 Bearing Capacity Properties of Steel Pipe Piles constructed on the stratified Mudrock through Pile Load Tests

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 서덕동<sup>2)</sup>, Deok-Dong Seo, 김재중<sup>3)</sup>, Jae-Joong Kim, 이정학<sup>4)</sup>, Jeong-Hak Lee

<sup>1)</sup> 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

<sup>2)</sup> 대림산업(주) 기술연구소 연구원, Researcher, Technology Research Institute, Daelim Industries.

<sup>3)4)</sup> 대림산업(주) 기술연구소 과장, Senior Researcher, Technology Research Institute, Daelim Industries.

**SYNOPSIS** : In this study bearing capacity properties and time-dependent behaviors of steel pipe piles constructed on the stratified mudrock which is partly weathered are analyzed through pile load tests(dynamic and static). Also, the comparison of long-term load-settlement characteristics with driven pile and SIP(Soil cement Injected Precast) pile are studied.

**KEYWORDS** : Bearing capacity properties, Time-dependent Behavior of pile, Stratified mudrock, Pile load test, Long-term load-settlement characteristics

### 1. 서론

우리 나라 지역의 대부분은 선캠브리아기의 변성암류와 중생대의 화강암이 주류를 이루고 있으나 영일분지일대는 신생대 제 3기에 형성된 퇴적분지로서 반고결된 이암, 역암, 사암, 혈암, 응회암 등이 호층을 이루고 육기와 침강의 반복으로 해성층과 육성층이 번갈아 부정합관계를 이룬다. 특히 퇴적 이암은 고결암의 강도가 약하고, 층리 및 성층이 발달하여 이방성이 심하며, 불연속면에 퇴적물이 개재하여 취약하다. 또한, 층리면을 따라 투수성이 크고 전단강도가 약하며, 대기노출 또는 침수와 같은 환경변화에 민감하므로 층리면을 따라 풍화가 촉진되어 이화하는 경향이 크다.(황정규, 1992)(이영휘,1996)

기성말뚝의 시공방법은 크게 타입식과 매입식으로 대별되며, 항타 말뚝의 경우 시공시 교란으로 시간경과에 따라 지지력의 변화가 심한 것으로 알려져 있다.(Poulos & Davis,1980) 보통의 경우 지지력은 간극수압의 소산 및 Tixotropy현상 등으로 증가하지만(Preim, 1989) 일부 특수지반에서는 지지력이 오히려 감소하는 것으로 알려져 있다.(Donald L. York etc.,1992)(Yang,1970) 특히, 퇴적 이암 지반에 말뚝을 항타시공할 경우 장기적으로는 교란된 선단부의 이완으로 인해 선단지지력이 감소될 수 있다. 본 연구에서는 퇴적이암 지반에 타입된 강관말뚝의 시간경과에 따른 지지력의 변화특성과 반복하중 및 장기하중을 재하할 경우에 대한 침하특성을 재하시험을 통해 파악하고자 하였다.

### 2. 지층특성

시험지반의 성층상태는 상부로 부터 성토(매립)층, 사질점토층, 풍화토(암)층, 연암층의 순으로 분포되어 있다. 풍화토(암)층의 경우 기반암인 이암(Mudstone) 또는 역암(Conglomerate)의 상부 및 중부풍화대로서 구성광물인 석영(Quartz), 장석류(Feldspar), 점토광물 등이 화학적 풍화작용으로 점토화된 상태

이며, 하부로 향할수록 견고하고 풍화에 강한 경암이 맥암(dyke rock)이 관입되어 잔재되어 있다. 또한, 비고결된 사암(Sandstone)층이 부분적으로 얇게 분포되어 있으며, 풍화정도 및 고결정도에 따라 깊이별로 비교적 연약한 층이 혼재하여 깊이별로 경연을 반복하는 특성을 보이고 분포 두께도 위치별로 매우 큰 차이를 보인다. 대표적인 지질주상도는 그림 1에 나타내었으나, 시험사례별로 토층별 분포두께 및 특성은 다소 차이가 있다.

심도 (m)	총 깊이 (m)	CLASSIFICATION OF ROCK & LAYER		DESCRIPTION	S.P.T		CORE RECOVERY		
		LOG	CUL-UMN		심도 (m)	폭 (Cm)	LENGTH	T.C.R (%)	R.O.D (%)
				# FIH ( 0.0 ~ 9.7m ) 산으로 침투에 의해 잔여 잔재 산화된 실리카 잔여물 등이	1.5	5/30			
					3.0	3/30			
					4.5	5/30			
					6.0	8/30			
					7.5	10/30			
					9.0	4/30			
9.2	9.2				10.5	5/30			
					12.0	7/30			
					12.0 ~ 14.0		50	0	
					14.0 ~ 16.0		80	0	
				16.0 ~ 18.0		48	0		
				18.0 ~ 20.0		85	0		
				20.0 ~ 21.0		50	0		
				21.0 ~ 23.0		30	0		
23.0	13.1			23.0 ~ 23.0m : 흙 질 모래 잔간 침투에 의해 산화된 실리카 잔재 23.0 ~ 25.5m : 흙 질 모래 25.5 ~ 25.8m : 실 사 대 25.8 ~ 28.5m : 흙 질 모래 28.5 ~ 28.6m : 실 사 대 28.6 ~ 28.9m : 흙 질 모래 28.9 ~ 28.9m : 실 사 대 28.9 ~ 28.95m : 실 사 대 28.95 ~ 28.9m : 흙 질 모래 28.9 ~ 29.0m : 실 사 대 29.0 ~ 29.3m : 흙 질 모래	23.0 ~ 24.2	80	0		
				24.2 ~ 26.0		80	0		
				26.0 ~ 27.5		48	0		
				27.5 ~ 29.0		80	0		
				29.0 ~ 31.5		50	0		
31.5	2.2			# Sandstone ( 29.3 ~ 31.5m ) 실 사암 ( 산, 잔여 침투 ) 실 사암	31.5 ~ 34.5	78	35		
32.3	1.0			# Mudstone ( 31.5 ~ 43.0m ) 31.5 ~ 32.5m : 흙 질 모래 (산간이 균열상) 32.5 ~ 34.5m : 흙 질 모래 34.5 ~ 36.5m : 실 사 대 36.5 ~ 38.0m : 흙 질 모래 38.0 ~ 38.1m : 실 사 대 38.1 ~ 39.5m : 흙 질 모래 39.5 ~ 39.8m : 실 사 대 39.8 ~ 40.5m : 흙 질 모래 40.5 ~ 40.8m : 실 사 대 40.8 ~ 43.0m : 흙 질 모래	34.5 ~ 36.5	85	5		
34.5	2.0				36.5 ~ 38.5	90	15		
36.5	2.0				38.5 ~ 39.5	80	0		
38.0	1.5				39.5 ~ 41.0	73	40		
38.1	0.1				41.0 ~ 43.0	65	0		
39.5	1.4								
39.8	0.1								
40.5	0.8								
40.6	0.1								
43.0	2.4								

그림 1. 시험지반의 대표적 성층상태

### 3. 시간경과에 따른 지지력의 변화특성

시험에 이용된 말뚝은 강관(Steel Pipe Pile)으로서 말뚝관입깊이, 지반특성, 햄머 종류 및 낙하고 등에 따라 다소 차이는 있으나 시공시 최종관입량(set per blow)은 대부분 5mm이하였다.

### 3.1 사례 1

퇴적이암지반에 시공된 강관말뚝의 시간경과에 따른 지지력의 변화특성을 파악하기 위해 Pile Driving Analyzer(PDA)를 이용하여 초기 항타종료시(End of Initial Driving)와 시간경과후 15일 경과시 재항타 시험(Restrike Test)을 실시하였으며, 시험결과 시공후 15일 경과시 주변마찰력은 약 90% 증가하였으나 선단지지력은 35% 감소한 것으로 나타났다. Davisson 방법에 의한 허용지지력은 61.0 ton에서 약 87 ton으로 증가하였는데 이는 주변마찰력의 증가효과에 의한 것으로 판단된다. 한편, 수회 추가타격을 통해 주변부를 교란시킨 후 관입특성을 확인한 결과 시공초기 항타종료시점과 비교하여 선단부의 추가적인 관입이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. 시험말뚝(사례 1)

구분	내용
종류 및 제원	강관(∅ 406mm × t 9mm)
단면적	112.4 cm <sup>2</sup>
관입깊이	26.0 m
시공방법	직항타(driven pile)
항타장비	유압햄머(7 ton)

표 2. 동재하시험결과(사례 1)

구분	주변마찰력	선단지지력	전체지지력	허용지지력
E.O.I.D.	59.7	93.4	153.1	61.0
R-15days	113.8	60.0	173.8	86.9

1. E.O.I.D. : End Of Initial Driving
2. R-15days : 시공후 15일 경과
3. 허용지지력 : Davisson 항복하중 / 2.0(F.S.)

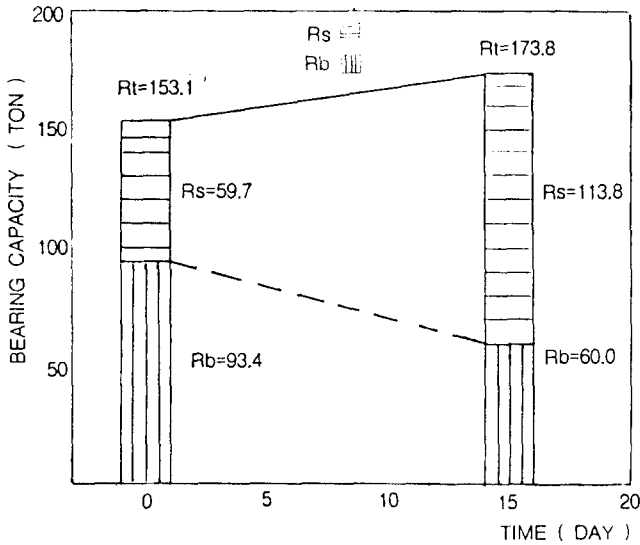


그림 2. 시간경과에 따른 지지력의 변화(사례 1)

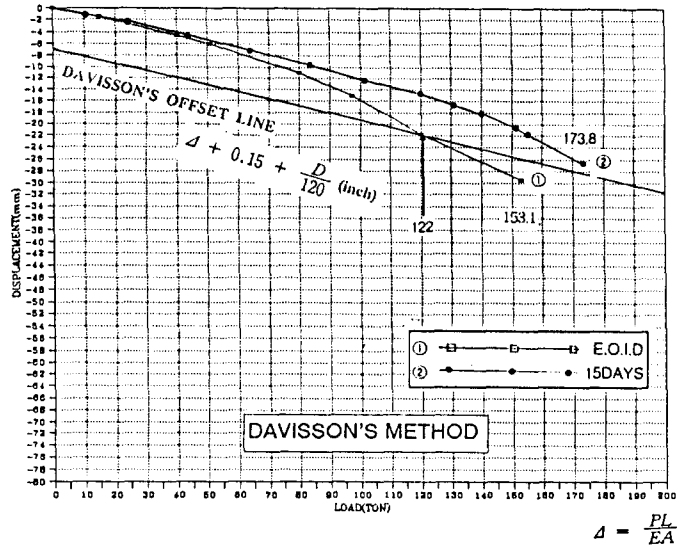


그림 3. 하중-침하곡선 비교(사례 1)

### 3.2 사례 2

표 3. 시험말뚝(사례 2)

구분	내용
종류 및 제원	강관(∅ 406mm × t 9mm)
단면적	112.4 cm <sup>2</sup>
관입깊이	16.5 m
시공방법	직항타(driven pile)
항타장비	Diesel Hammer(2.5 ton)

표 4. 동재하시험결과(사례 2)

구분	주변마찰력	선단지지력	전체지지력	허용지지력
E.O.I.D.	86.3	47.3	133.6	66.8
R-1 day	127.1	42.9	170.0	85.0이상

1. E.O.I.D. : End Of Initial Driving
2. R-1day : 시공후 1일 경과
3. 허용지지력 : Davisson 항복하중 / 2.0(F.S.)

초기항타종료시와 시공후 1일 경과시에 시험을 실시하였으며, 시험결과 시공후 1일 경과시 주변마찰력은 약 50% 증가하였으며 선단지지력은 큰 변화가 없었다. Davisson 방법에 의한 허용지지력은 66.8 ton에서 85 ton이상으로 증가하였다.

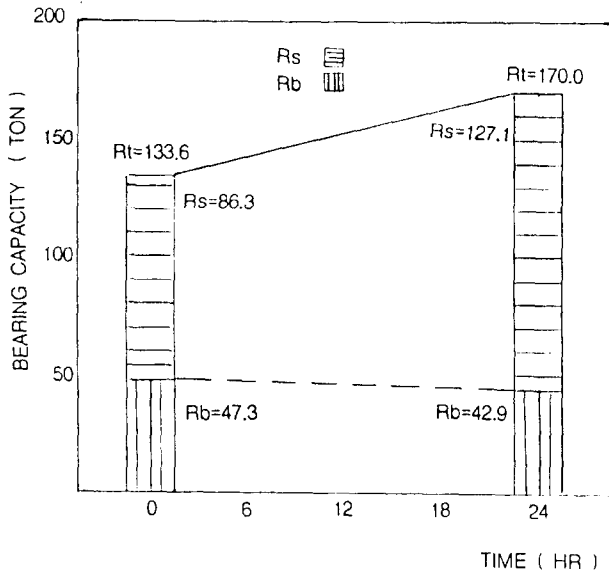


그림 4. 시간경과에 따른 지지력의 변화(사례 2)

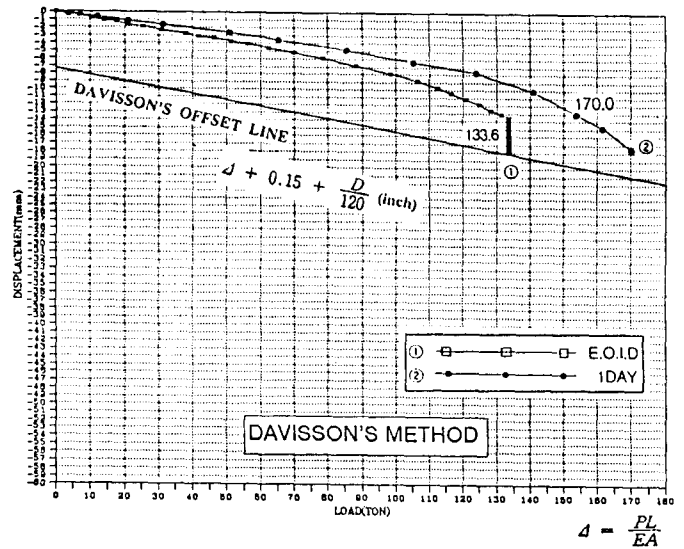


그림 5. 하중-침하곡선 비교(사례 2)

### 3.3 사례 3

초기항타종료시와 시공후 7일 및 90일 경과시에 시험을 실시하였으며, 시험결과 시공후 7일 경과시 주변마찰력은 약 70% 증가하였으며 선단지지력은 약 48% 감소하였다. 90일 경과후의 경우 주변부 토사를 1m정도 제거한 상태여서 동일조건에서의 주변마찰력 변화 특성은 분석하기 어려웠으나 깊이별 주변마찰 분포특성으로 보아 다소 감소한 것으로 나타났다. 선단지지력의 경우 초기에 비해 56%, 7일 경과시에 비해 약 16% 감소하여 선단부가 장기적으로 꾸준히 이완된 것으로 판단된다. Davisson 방법에 의한 허용지지력은 항타초기에서 7일경과시는 변화가 없었으며 90일 경과시 다소 감소하였다.

표 5. 시험말뚝(사례 3)

구분	내용
종류 및 제원	강관(Φ 508mm × t 10mm)
단면적	156.5 cm <sup>2</sup>
관입깊이	7.6 m (6.6m)
시공방법	직항타(driven pile)
항타장비	Diesel Hammer(3.5 ton)

표 6. 동재하시험결과(사례 3)

구분	주변마찰력	선단지지력	전체지지력	허용지지력
E.O.I.D.	70.4	116.9	187.3	81.0
R-7days	120.7	60.6	181.3	81.0
R-90days	83.8	50.8	134.6	67.3

1. R-90days의 경우 주변상부 토사가 약 1m 제거된 상태에서의 시험결과임.

### 3.4 사례 4

표 7. 시험말뚝(사례 4)

구분	내용
종류 및 제원	강관(Φ 406mm × t 9mm)
단면적	112.4 cm <sup>2</sup>
관입깊이	28.0 m
시공방법	직항타(driven pile)
항타장비	유압햄머 (7 ton)

표 8. 동재하시험결과(사례 4)

구분	주변마찰력	선단지지력	전체지지력	허용지지력
E.O.I.D.	113.0	51.3	164.3	80.5
R-1 day	216.0	52.1	268.2	134.1 이상

1. E.O.I.D. : End Of Initial Driving
2. R-1day : 시공후 1일 경과
3. 허용지지력 : Davisson 항복하중 / 2.0(F.S.)

초기항타종료시와 시공후 1일 경과시에 시험을 실시하였으며, 시험결과 시공후 1일 경과시 주변마찰력은 약 90% 이상 증가하였으며, 선단지지력은 변화가 거의 없는 것으로 나타났으나 선단부에 전달된 타격에너지가 다소 부족하여 선단지지력은 다소 크게 발휘될 수 있을 것으로 보여 본 사례의 경우 1일 경과시 주변마찰력 및 선단지지력이 모두 증가한 것으로 판단되며 이후 제항타한 자료가 없어 장기적인 지지력변화특성 규명은 어려웠다.

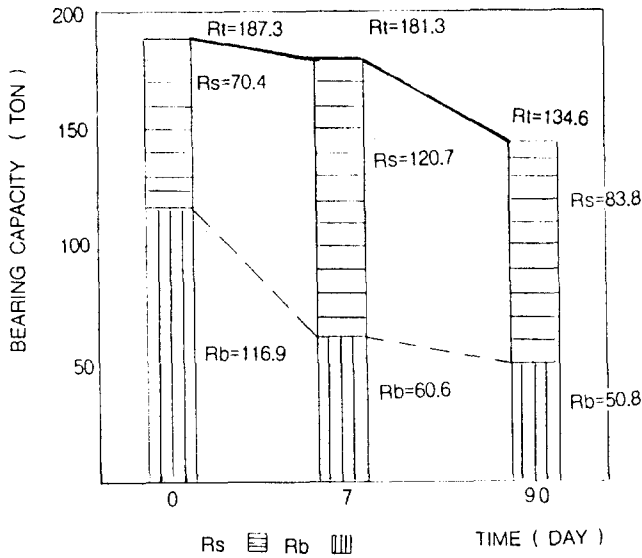


그림 6. 시간경과에 따른 지지력의 변화(사례 3)

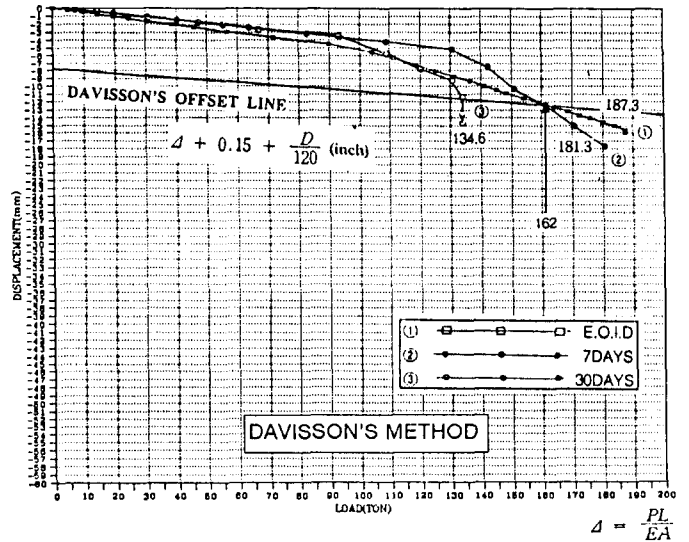


그림 7. 하중-침하곡선 비교(사례 3)

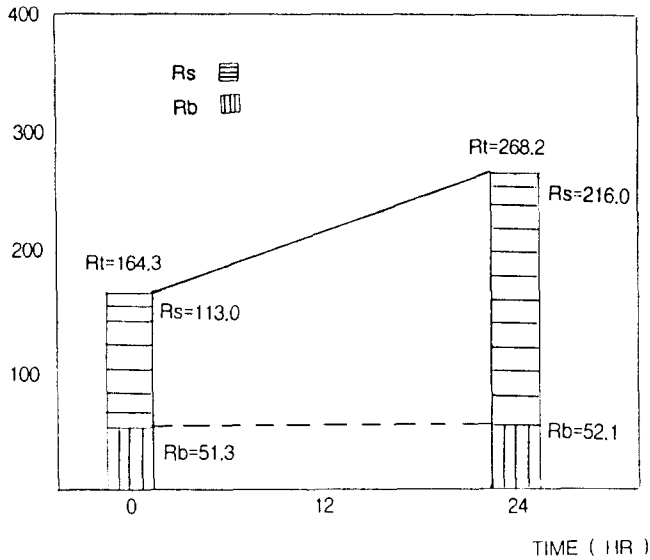


그림 8. 시간경과에 따른 지지력의 변화(사례 4)

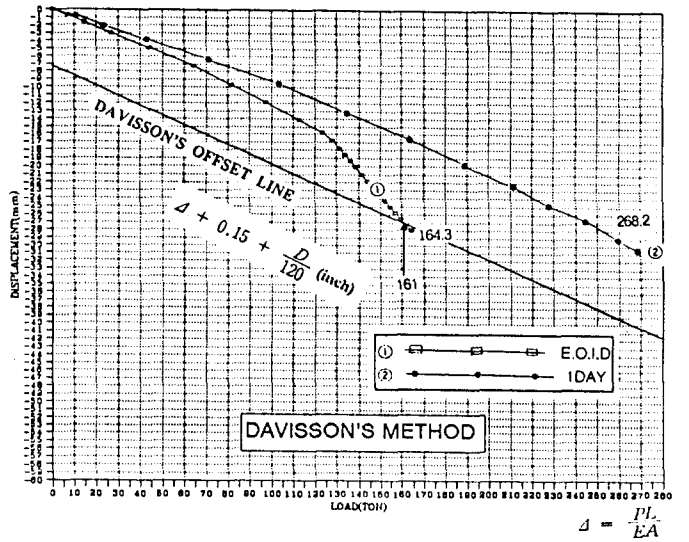


그림 9. 하중-침하곡선 비교(사례 4)

3.5 사례 5

표 9. 시험말뚝(사례 5)

구분	내용
종류 및 제원	강관(Φ 406mm × t 9mm)
단면적	112.4 cm <sup>2</sup>
관입깊이	18.0 m
시공방법	직항타(driven pile)
항타장비	Diesel Hammer(3.5 ton)

표 10. 동재하시험결과(사례 5)

구분	주면마찰력	선단지지력	전체지지력	허용지지력
E.O.I.D.	130.0	77.5	207.5	103.8
R-1 day	155.8	64.2	220.0	110이상

1. E.O.I.D. : End Of Initial Driving
2. R-1day : 시공후 1일 경과
3. 허용지지력 : Davisson 항복하중 / 2.0(F.S.)

초기항타종료시와 시공후 1일 경과시에 시험을 실시하였으며, 시험결과 시공후 1일 경과시 주면마찰력은 약 20%이상 증가하였으나 선단지지력은 약 17% 감소한 것으로 나타났다. 허용지지력은 다소 증가하였으며 이는 주면마찰력의 증가효과에 의한 것으로 판단된다. 한편, 수회 추가타격을 통해 주면부를

교란시킨 후 관입특성을 확인한 결과 사례 1의 경우와 마찬가지로 시공초기 항타종료시점과 비교하여 신단부의 추가적인 관입이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

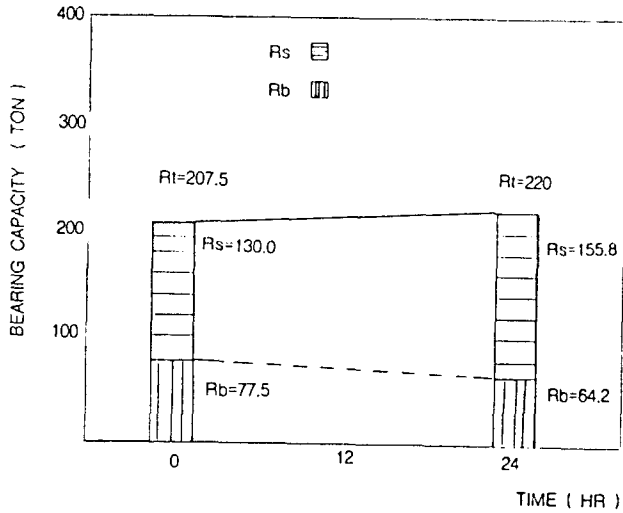


그림 10. 시간경과에 따른 지지력의 변화(사례 5)

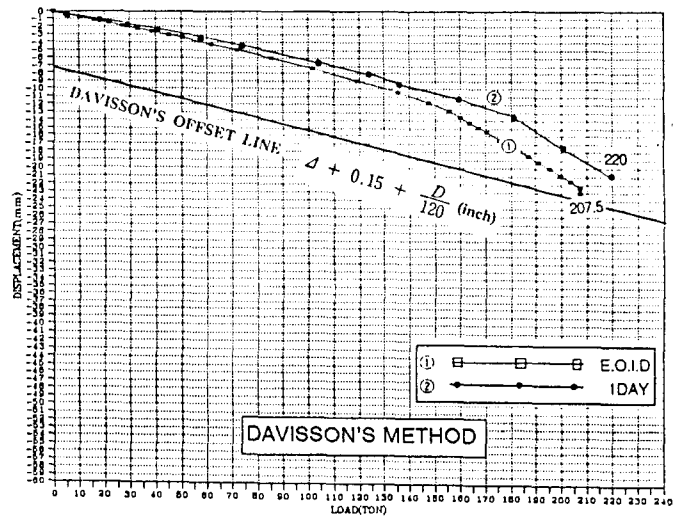
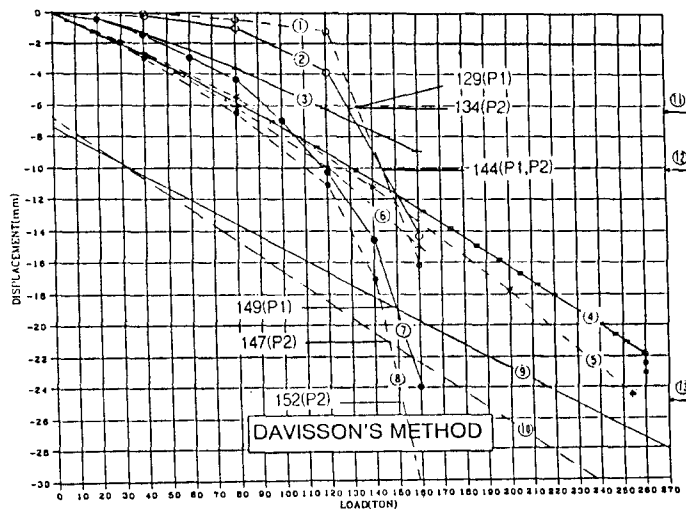


그림 11. 하중-침하곡선 비교(사례 5)

4. 장기제하에 의한 침하특성

표 11. 허용지지력 판정결과(강관  $\phi$  406mm  $\times$  t 9mm)

허용지지력 판정기준		허용지지력 (ton/本)				비고
		P 1	P 2	P 3	P 4	
그래프법	S - logT	80	80	80	80 이상	관입깊이: 17.5m(P 1), 22.5m(P 2) 27m(P 3), 29m(P 4)
	logP - logS	62.5	59	64	80 이상	
	ds/dlogT - P	60.5	62	67.5	80 이상	
전침하량 기준	Terzaghi & Peck, 일본토질공학회 (1.0inch $\approx$ 25mm)	80 이상	76	80 이상 (80)	80 이상	P 3 : 항타말뚝의 장기제하 P 4 : SIP 말뚝의 장기제하
순침하량 기준	COE(0.25inch=6.35mm)	64.5	67	-	-	( )값은 장기침하 고려한 허용지지력
	DIN(0.025D=10.15mm)	72	72	-	-	
Davisson Method		74.5	73.5	80(78)	80 이상	



- ① Net Settlement Curve(P2)
- ② Net Settlement Curve(P1)
- ③ Elastic Settlement Curve(P1)
- ④ 동재하시험(P1) E.O.I.D
- ⑤ 동재하시험(P2) E.O.I.D
- ⑥ Elastic Settlement Curve(P2)
- ⑦ 정재하시험(P1)
- ⑧ 정재하시험(P2)
- ⑨ DAVISSON'S OFFSET LINE(P1)
- ⑩ DAVISSON'S OFFSET LINE(P2)
- ⑪ COE(Net Settlement) ; 6.35 mm
- ⑫ DIN(Net Settlement) ; 10.15 mm
- ⑬ Terzaghi & Peck(Gross Settlement)

그림 12. 하중-침하량 곡선(반복제하-항타말뚝)

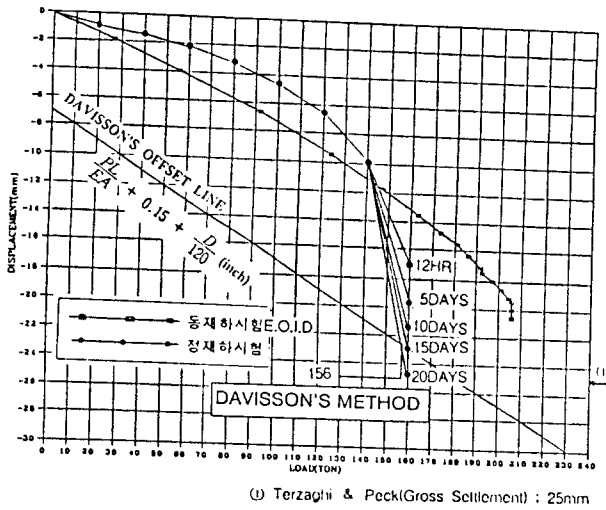


그림 13. 하중-침하량 곡선(장기재하-항타말뚝)

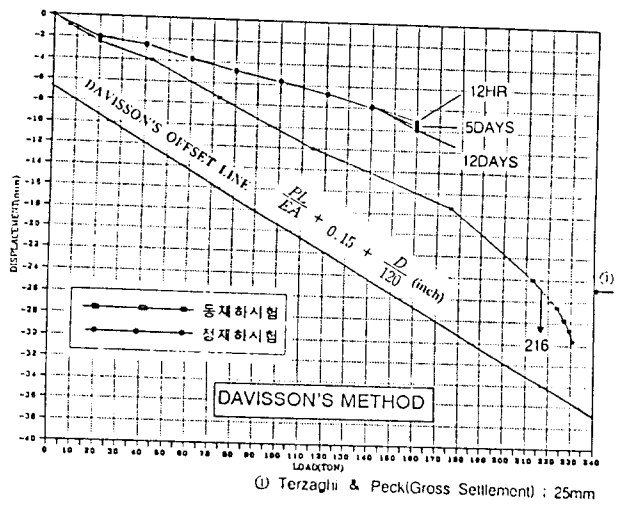


그림 14 하중-침하량 곡선(장기재하-SIP)

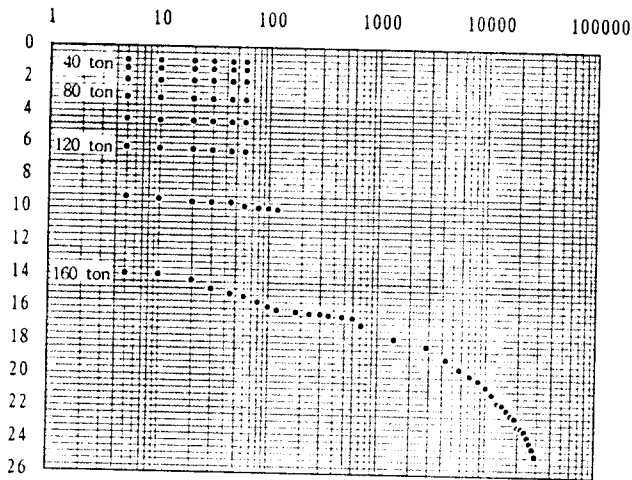


그림 15. s - log t graph (장기재하-항타말뚝)

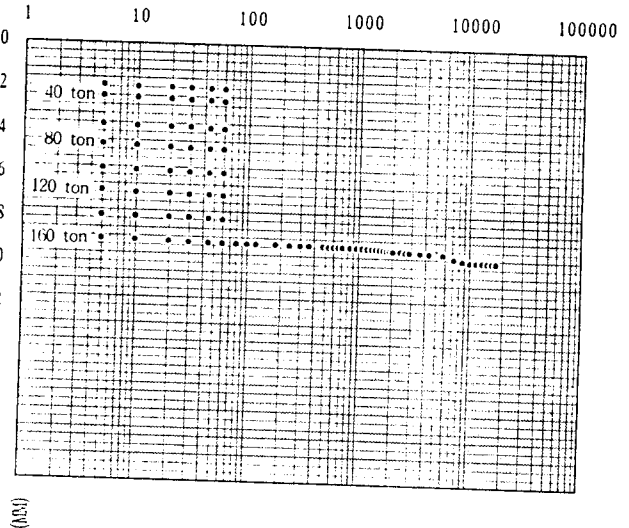


그림 16. s - log t graph (장기재하-SIP)

시험말뚝은 강관( $\phi 406\text{mm} \times t 9\text{mm}$ ) 말뚝으로서 시공후 약 7일이 경과된 시점에서 시험을 실시하였으며, 항타말뚝의 경우 시공시 선단부가 지지층에 도달된 것으로 판단된 말뚝에 대해 반복재하 2분, 장기재하 1분을 실시하였고, SIP말뚝의 경우 장기재하 1분을 실시하였다.

반복하중재하시험(Cyclic Loading Test)결과 주면마찰저항특성을 보이는 초기 cycle에서는 소성변위가 매우 적었으나 침하량이 대체로 10mm 발생된 후의 하중단계(약 120ton) 부터 회복탄성변위가 매우 적게 나타나 이 때부터 선단부로 하중이 전달된 것으로 판단된다. 따라서 시험시 주면마찰력은 120ton 이상일 것으로 보며, 선단부 이암의 경우 소성거동특성을 보였다.(그림 12)

표준재하방식(Standard Load Test)의 응용형태로서 항타시공된 말뚝을 최대하중에서 20일간 장기재하한 결과 침하량은 최대하중에서 10mm 이상 지속적으로 증가하였다.(그림13, 그림 15) 특히, 표준재하방법에서 규정된 최대하중에서 12HR 경과시에서는 항복에 도달하지 않은 것으로 나타났으나 15일 경과시 부터 항복침하량에 도달한 것으로 나타났다.(Davisson법 적용시) 이는 말뚝의 현행 품질관리를 위해 규정된 시험방법을 본 사례의 경우처럼 소성특성 및 장기적으로 이완되는 특성을 가진 지지층에 타입된

말뚝에 적용할 경우 허용지지력을 과대평가할 수 있음을 보여준다. 한편, 항타말뚝의 대안공법으로서 마찰지지형 말뚝으로 시공된 SIP말뚝에 대해 12일간 장기재하한 경우 1mm 이하의 침하량 증가를 보여 항타말뚝과는 큰 차이를 보였다.(그림 14, 그림16)

항타말뚝의 경우 동재하시험과의 비교결과 주변마찰특성을 보이는 초기 하중단계에서는 정재하시험시의 침하량이 동재하시험에 비해 작거나 비슷한 값은 보였으나 하중이 증가할수록 동재하시험에 비해 침하량이 급격히 증가하는 경향을 보였으며, 특히 장기재하에 의한 침하량을 감안할 경우 이 차이는 더욱 큰 것으로 나타났다. 마찰지지형으로 설계 시공된 SIP말뚝의 경우 동재하시험시 침하량이 전체적으로 크게 나타났으나 이는 동재하시험이 정재하시험 이전에 실시되어 주변부 충전물의 양생에 따른 강도차이에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 본 시험 사례들로 볼 때 퇴적 이암지반에 선단지지형 말뚝으로 설계 시공된 말뚝에 대해서는 선단부의 장기적인 이완특성을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

- 1) 퇴적이암 지반에 타입된 강관말뚝의 Restrike Test 결과 주변마찰력은 시공초기에 비해 증가하는 것으로 나타났으나 선단지지력의 경우 감소하거나 변화가 작았으며, 허용지지력은 대체로 증가하거나 이는 주변마찰력의 증가효과에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 항타시공된 말뚝을 장기재하한 결과 지속적인 침하를 보였으며, SIP공법으로 시공된 말뚝을 장기재하한 결과 매우 작은 침하량 증가를 보였다.
- 3) 본 시험사례들로 볼 때 퇴적 이암지반에 항타시공된 강관말뚝의 경우 동재하 또는 표준정재하시험에 의한 허용지지력 결정시 지지력을 다소 과대평가할 수 있음을 알 수 있었으며, 허용지지력 평가시에는 선단부의 장기적인 이완경향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구는 한정된 지역에서의 시험사례 분석결과이므로 향후 퇴적이암지반에 대한 종합적인 지지력특성연구가 지속되어야 할 것으로 본다.

## 참고문헌

1. 류정수(1995), "말뚝재하시험에 의한 연직지지력 추정", **홍익대학교 대학원**, 서울.
2. 이영휘(1996), "포암이암층의 Slaking, 팽창 및 전단강도특성", **한국지반공학회지**, 제 12권, 제 2호, pp.33~42.
3. 황정규(1992), **지반공학의 기초이론**, 구미서관, 서울, pp. 257~266.
4. Donald L. York, Walter G. Brusey, Frank M. Clemente, and Stephen K. Law(1992), "Setup and Relaxation in Glacial Sand", *ASCE Annual Meeting*, New York.
5. H.G. Poulos and E.H. Davis(1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and sons, New York, pp. 6~17.
6. Preim ,M., March,R. and Hussein ,M.(1989). "Bearing capacity of piles in soil, with time dependent characteristics." *Piling and Deep Foundations. Proc. of the 3rd Int. Conf.*, London, pp.363-370.
7. Yang,N.C.(1970). "Relaxation of piles in sand and inorganic silt." *Journal of soil Mech. and Foundation Eng.*, ASCE ,Vol.96, SM2, pp.395-409.
8. Tatsunori Matsumoto(1994), "Load tests and design of steel pipe piles in a soft rock", *Conf. on Deep Found. and Ground Improvement Schemes*, Bangkok, Thailand, pp.121~156.