

현장재하시험을 통한 강관 매입말뚝의 지지력 안전을 제안

Analysis of Bearing Capacity and Safety Factor of Dynamic Load Test of Prebored and Precast Steel Pile

박 종 전¹ Park, Jong-Jeon

정 상 섬² Jeong, Sang-Seom

박 정 식¹ Park, Jeong-Sik

Abstract

In this study, the static and dynamic load tests were carried out to propose the safety factor of steel prebored and precast piles in weathered rocks. The axial load tests have been conducted on test piles with nominal diameters of 0.508 and 0.457 m. The piles were subject to static loading tests (14 times) and dynamic loading tests (EOID 14times, Restrike 14times). The dynamic loading tests were first executed after the casting of test piles (① initial EOID test). ②In the succeeding 28 days from completion of construction, static load tests were performed and ③final restrike tests were carried out after 15 days from the static test. As a result, the bearing capacity based on Davisson method was 15% higher than that of the restrike tests. The bearing capacity of the static load tests were larger than that of the dynamic tests. By comparing the safety factor through various loading tests, the safety factor of dynamic loading tests were suggested to be lowered to 1.75 from the conventional 2.0.

요 지

본 연구에서는 풍화암에 근입된 강관 매입말뚝의 안전을 제안을 위하여 정재하시험과 동재하시험을 수행하였다. 현장재하시험은 직경이 0.508, 0.457m 인 시험말뚝을 제작하여 정재하시험(14회)과 동재하시험(EOID 14회, Restrike 14회)을 실시하였다. 이때, 재하시험은 시험말뚝 시공완료 후 ①초기동재하시험(EOID)을 수행하였으며, ②시공완료 28일 후 정재하시험을 시행하였으며, ③정재하시험 완료 후 15일 후에 재항타동재하시험(Restrike)을 실시하였다. 본 연구 결과 Davisson 판정법의 동재하시험을 이용한 지지력 산정 결과 정재하시험 대비 재항타동재하시험은 약 15% 낮게 나타났다. 정재하시험과 동재하시험의 지지력 분석을 통하여 안전율을 비교하였고, 최종적으로 동재하시험 안전율을 기존 2.0에서 1.75로 수정·제안하였다.

Keywords : Steel pile, Prebored and precast pile, Dynamic load test, Static load test, Safety factor, Bearing capacity

1 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-2123-8378, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 고속도로 교량건설이 산악지역에 집중되고 대형화됨에 따라 말뚝기초 사용량이 증가하고 있으며 수평강성이 우수하고 말뚝두부 연결 및 말뚝이음에 용이한 강관말뚝이 선호 되고 있다. 특히, 건설소음 및 진동 규제 등의 문제로 최근 고속도로를 비롯한 일반 도로교의 교량 기초로 항타 말뚝 보다는 매입말뚝공법 적용이 급격히 증가하는 추세이다.

말뚝설계 시 각종 현장 원위치시험 및 실내토질 시험 결과를 기준으로 지층구성 및 토질정수를 결정하고, 말뚝의 지지력을 산정한다. 그 후 정역학적 및 동역학적 지지력 시험을 실시하여 설계지지력을 만족하는지를 확인하게 된다. 하지만 설계 시 결정한 지지력과 재하시험을 통한 지지력이 상이하기 때문에 정재하 및 동재하시험의 결과를 분석하여 합리적인 지지력 결정방법이 중요하다고 알려져 있다(Lee et al., 2000). 정재하시험은 기초말뚝의 거동을 파악하기 위해 신뢰도가 높은 재하시험 방법이나 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 이러한 단점들의 이유로 최근에는 동재하시험이 말뚝의 품질관리 및 지지력확인을 위하여 보편적으로 시행되고 있으며 정재하시험보다 얻을 수 있는 데이터가 많은 장점이 있다. 하지만, 동재하시험의 경우 정재하시험과는 다르게 지지력을 간접적으로 산정하기 때문에 정재하시험에 비해 신뢰도가 떨어지는 것으로 알려져 있었다.

대부분 말뚝타설 후 정재하시험과 동재하시험을 시행하는데, 이 두 시험 결과를 비교·평가할 때 가장 큰 문제점은 두 시험의 직접적 결과 비교가 곤란하다는 것이다. 따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위해 연구가 진행되었는데, 국외에서는 항타말뚝에 대해 Goble et al.(1980)과 Likins et al.(1996) 등이 동재하시험과 정재하시험 결과의 차이를 분석하여 지지력 차이가 상당히 줄었다는 것을 보고하였다. 국내의 경우 항타말뚝에 대해 정재하시험과 동재하시험의 지지력 연구가 수행되었으며(Lee et al.(1994), Hong et al.(1995), Lee et al.(2002), Ki et al.(2009)), 콘크리트 말뚝은 현장타설말뚝의 거동 분석 및 지지력 비교 분석이 수행되었다(Hong et al.(2005)). 그리고 Park(2017)은 PHC 매입말뚝에 대해 정재하시험과 동재하시험 결과를 비교 분석하여 수정동재하 지지력을 제안하였다. 이와 같이 항타말뚝과 콘크리트 말뚝, PHC 매입말뚝에 대한 정재하시험과 동재하시험의 신

뢰도 분석 연구가 활발히 진행되고 있는 반면, 강관 매입말뚝은 이러한 연구가 미흡할 뿐만 아니라 여타 다른 말뚝과 시공방법 및 지지력 발현 원리가 상당히 다르므로 연구의 필요성이 대두되고 있다.

따라서 본 연구에서는 강관 매입말뚝에 대해 정재하시험 과 동재하시험 간의 안전율 분석을 위하여 재하시험을 실시하였다. 정재하시험은 말뚝의 극한하중 확인을 위하여 최대하중까지 재하를 하였으며, 동재하시험은 초기동재하시험(EOID)과 재항타동재하시험(Restrike)을 수행하였다. 최종적으로 지지력 분석 및 비교를 통하여 설계지지력 산정을 위한 동재하시험 안전율을 제안하였다.

2. 재하시험

본 연구에서는 강관매입말뚝의 거동 및 지지력을 분석하고자 풍화토, 풍화암 지반에 근입된 말뚝에 대해 초기동재하시험(EOID) 14회, 재항타동재하시험(Restrike) 14회, 정재하시험 14회를 실시하였다.

2.1 동재하시험

동재하시험은 말뚝항타분석기(PDA : Pile Driving Analyzer)를 이용, 항타로 인한 말뚝의 변위와 가속도를 항타 즉시 분석하여 항타기의 효율적인 작동여부, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 예상지지력, 말뚝의 손상정도 등을 출력한다. 따라서, 동재하시험을 실시할 경우 시공과정에 있는 항타기의 선정, 시공방법, 관입심도 및 말뚝의 종류 등 파일공사에 있어서의 전반적인 사항들을 미리 파악하여 적용할 수 있어 보다 합리적인 시공을 할 수 있게 된다. 동재하시험 결과로부터 말뚝의 허용지지력을 판정하기 위해서는 전체지지력에 안전율을 적용하여야 한다. 이때 사용할 수 있는 안전율은 미국토목학회(ASCE)에서 Table 1과 같이 제안하고 있다.

동재하시험은 각 총 14분 말뚝에 대해 시험말뚝의 시공 후 각 말뚝마다 초기 동재하시험(EOID)이 수행되었고, 정재하시험 후 최소 15일이 경과한 후 재항타동재하시험(Restrike)을 수행하였다. 이때, 사용된 해머는 자유낙하 식 Drop Hammer를 이용하여 타격하였다. Table 2는 각 4개 현장의 동재하시험 조건 값들을 정리하였다. 아산현장과 밀양현장은 재항타동재하시험을 수행 시 게이지 설치를 위해 말뚝 주변 지반의 굴착을 수행하였

Table 1. Safety factor

Method of determining capacity	Loading condition	Minimum factor safety	
		Compression	Tension
Theoretical or empirical prediction to be verified by pile load test (Static loading test)	Usual	2.0	2.0
	Unusual	1.5	1.5
	Extreme	1.15	1.15
Theoretical or empirical prediction to be verified by Pile Driving Analyzer (Dynamic loading test)	Usual	2.5	3.0
	Unusual	1.9	2.25
	Extreme	1.4	1.7
Theoretical or empirical prediction not verified by load test (Experimental Equation)	Usual	3.0	3.0
	Unusual	2.25	2.25
	Extreme	1.7	1.7

Table 2. Field dynamic load test condition value

Type	A site		B site				C site						D site		
	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Test-5	Test-6	Test-7	Test-8	Test-9	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	
Embedded depth (m)	EOID	10.7	13.1	11.7	10.6	13.6	10.0	11.5	12.6	9.7	13.7	14.8	16.2	7.4	8.3
	Restrike	10.9	13.2	11.95	10.75	13.75	10.25	10.9	10.55	9.4	12.9	14.4	15.9	6.2	7.2
Hammer weight (ton)	EOID	5.0											2.5		
	Restrike	4.0													
Hammer height (m)	EOID	2.5		1.5				2.5						3.0	
	Restrike	3.0		2.5				3.0							
Final penetration (mm/bl)	EOID	22	13.6	30	24	25	23	33	7.0	27	9	21	3	12	10
	Restrike	3	1.8	4.8	4.8	2.2	2.6	8.7	0.1	4.5	0.4	0.1	0.1	3	1.1
Skin average N value		36	35	20	18	27	25	25	26	15	23	28	29	26	31
End bearing N value		50													

다. 동재하시험의 결과는 CAPWAP 분석 방법을 이용하여 산정하였다.

2.2 정재하시험

2.2.1 지반조건

현장재하시험은 14개 말뚝에 대해 시행되었으며, 지반은 대표적인 한 단면으로 Fig. 1에 나타난 바와 같이 지표로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암층으로 구성되어 있다. 시험대상 지반의 물성치 추정을 위하여 현장 시험 및 교란 시료에 대한 실내 시험을 실시하였으며 기존 지반조사 보고서, 각종 문헌자료와 비교 분석을 통하여 추정된 지반 물성치를 요약하면 Table 3과 같다.

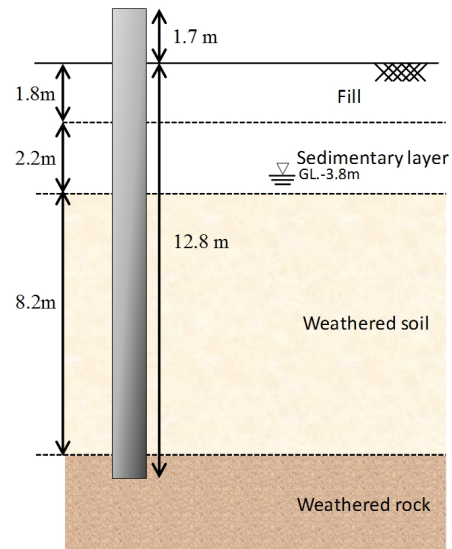


Fig. 1. Soil profiles for test piles

Table 3. Physical properties of in-situ soil

Soil	USCS	Unit weight, γ_t (kN/m ³)	Cohesion c (kPa)	Friction angle ϕ (deg)	Young's modulus E (MPa)	Poisson's ratio, ν
Fill	SM	17.0	0	29	10	0.3
Sedimentary layer	GP	20.0	5	29	40	0.3
Weathered soil	SM	20.0	22	39	127	0.3
Weathered rock	-	21.5	35	32	185	0.3

Table 4. Field ground condition

Type		N value position															
		1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m	13m	14m	15m	16m
A site	BH-1	5	13	28	12	16	50	50	50	50	25	50	50	50	50	50	50
	BH-2	6	19	31	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
B site	BH-3	12	23	27	9	14	29	17	29	50	50	50	50	50	50	-	-
	BH-4	18	14	7	6	11	28	24	48	50	50	50	50	50	50	50	-
	BH-5	21	15	15	10	16	30	31	40	50	50	50	50	50	50	50	50
C site	BH-6	7	6	9	12	15	16	27	22	29	50	50	50	50	50	50	50
	BH-7	6	7	5	9	10	13	23	25	50	50	50	50	50	50	50	50
	BH-8	4	2	2	6	12	15	27	16	50	50	50	50	50	50	50	50
D site	BH-9	5	8	9	12	50	50	50	50	50	50	50	50	-	-	-	-
	BH-10	5	9	11	26	50	50	50	50	50	50	50	50	50	-	-	-

각 지반조건은 조금씩 상이하였지만 대부분 지반은 풍화계열이 주로 분포하고 있는 국내 전반에 걸쳐 분포하는 전형적인 지반 조건을 반영하고 있다. 각 지역별 대표 심도별 N 값은 Table 4와 같다. 주면의 평균 N값은 상이하였지만, 선단의 경우 N값 50 이상에 근접 되었다.

2.2.2 시험말뚝 시공

각 현장의 시공방법은 매입말뚝 공법 중 가장 많이 사용되고 있는 선굴착 후 최종경타(케이싱) 공법으로 적용하였다. 굴착 시 T4와 오거굴착기를 이용하여 굴착을 하였으며, 선굴착 후 최종경타(케이싱) 공법은 천공홀의 공벽유지를 위해 강관케이싱이 사용되었고, 이후 선단 시멘트풀 주입, 말뚝 삽입, 주면 시멘트풀 주입, 마무리 경타 순으로 시공되는 방법이다. Fig. 2는 선굴착

후 최종경타 시공 과정을 묘사한 그림이다.

사용된 시험말뚝의 경우 강관 파이프형 말뚝을 사용하였으며, 현재 현장에서 대표적으로 사용되는 직경 0.508m, 0.457m 두께 0.012m 강관말뚝을 사용하였다. 이때, 굴착공경은 말뚝의 주면 게이지를 고려하여 말뚝의 직경보다 0.2m 크게 하였다. 시험말뚝 시공 시 시멘트풀 배합비는 선단부와 주면부 모두 물-시멘트비(W/C) 70%를 사용하였다.

본 연구에서는 다루지는 않지만 말뚝의 하중전이분석을 위하여 진동형 타입의 게이지를 각 말뚝 당 좌·우 각 10개씩 총 20개를 설치하였으며(Fig. 3), 말뚝의 두부 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 두부 좌·우에 각각 하나씩 설치하였다.

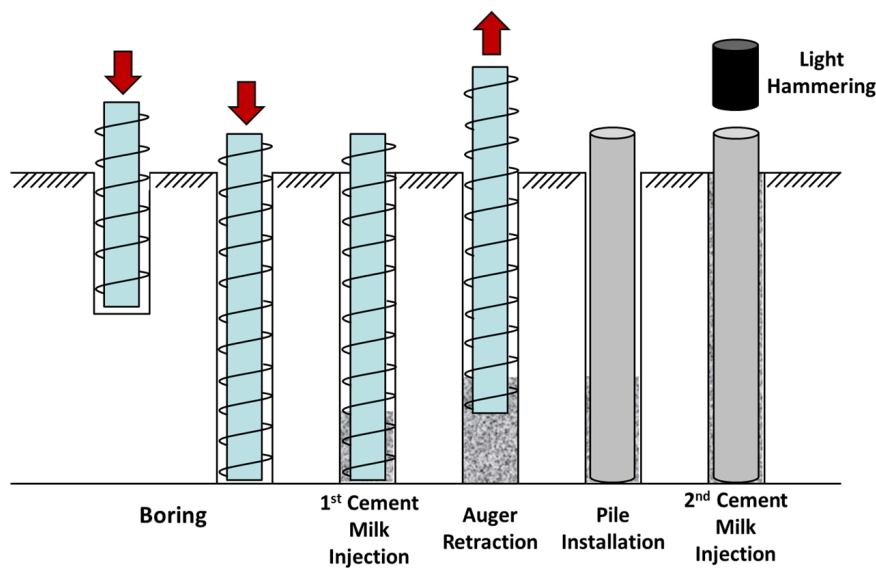


Fig. 2. Typical installation procedure

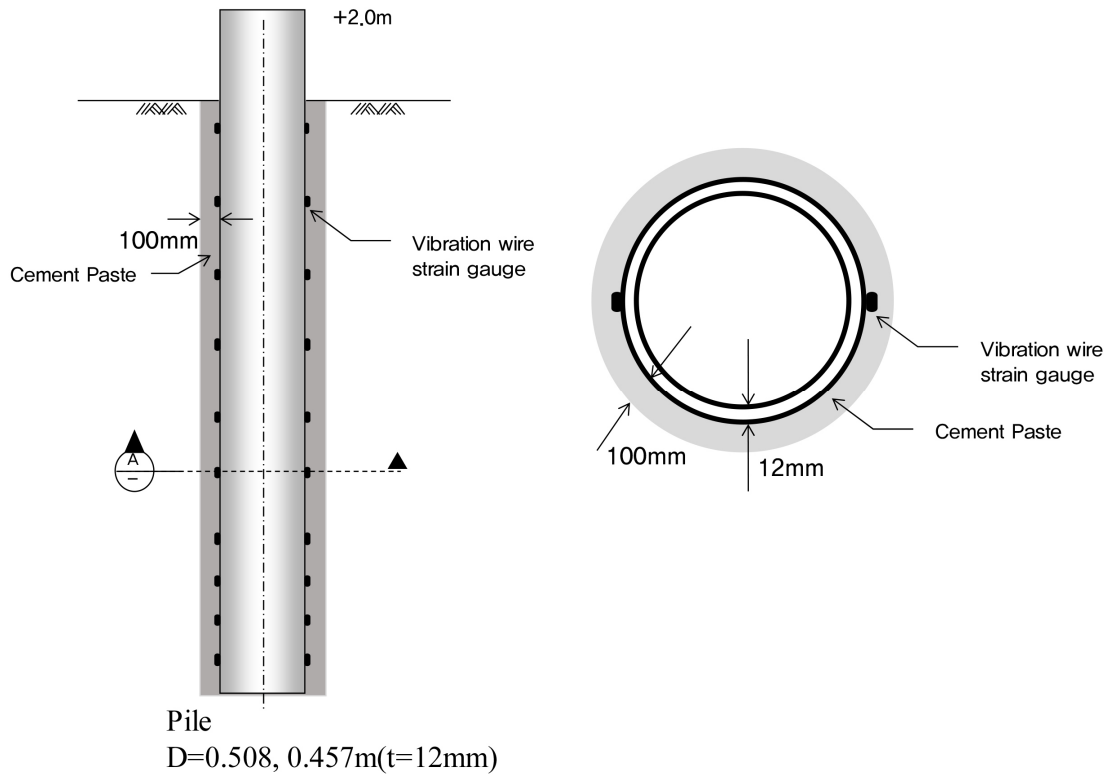


Fig. 3. A schematic representation of instrumented piles

2.2.3 재하방법

본 실험에서는 말뚝길이 7.3~17.5m의 시험말뚝이 총 14본이 시공되었다. 자유장은 2.0m 이내로 시공하였으며, 말뚝의 선단 근입조건은 SPT N값 50/20~50/5 사이의 풍화토 와 풍화암 대상으로 수행하였다.

본 실험에서는 ASTM D1143-81(1994)에서 규정하고 있는 급속재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태로 실시하였다. 하중방법은 총 시험하중의 25%, 50%, 75%, 100% 4단계로 나누어 재하 하였으며 각 단계마다 20분간 하중을 유지시켰다. 또한 100% 하중이 재하되면 50% 씩 단계별로 재하하되 각 단계마다 10분씩 유지하도록 하였다.

이때, 시험하중은 보통 설계하중의 2~3배를 고려하여 선정하는데 본 연구에서는 시험말뚝의 극한하중 평가를 위하여 시험말뚝이 파괴될 때까지 최대 5배의(유압잭 스트로크 및 재하대 용량) 최대하중을 재하 하였다.

본 연구에서 사용된 재하방법은 반력앵커의 인발저항력을 이용하였으며, 총 600ton의 하중을 재하 할 수 있도록 총 6공에 대해 공당 100ton의 인장력을 가지도록 설계하였다.

2.3 재하시험을 통한 허용지지력 산정

말뚝의 허용지지력은 시험자가 하중 조건과 침하 조건 등을 종합적으로 검토하여 결정하는데, 재하시험 결과를 이용하여 말뚝의 허용지지력을 산정할 때 다음 조건을 만족하는 최소값을 선정한다.

- ① 항복하중의 1/2 이하
- ② 극한하중의 1/3 이하
- ③ 상부구조물에 의해 결정되는 허용침하량에 해당하는 하중 이하(안전율 고려)
- ④ 전침하량에 의해 구한 하중의 1/3 이하, 잔류침하량으로 구한 하중의 1/2
- ⑤ 말뚝 재료의 허용압축량 이하

본 연구에서 수행 된 허용지지력 산정법은 하중(P)-침하량(S) 관계가 분명한 극한상태(하중증가 없이 침하량이 급격히 증가하는 상태)가 나타날 때의 하중을 극한하중으로 간주하고 안전율 3.0으로 나누어 허용지지력을 산정한다.

Fig. 4에서 하중-침하량 곡선이 연직으로 될 때의 하중 P2가 극한하중이 된다. 그러나 일정 하중에 이르지 않는 경우에는 하중-침하량 곡선이 급격히 수직으로 되고, 작은 하중 증가에 대해서는 큰 침하를 보이는 점의

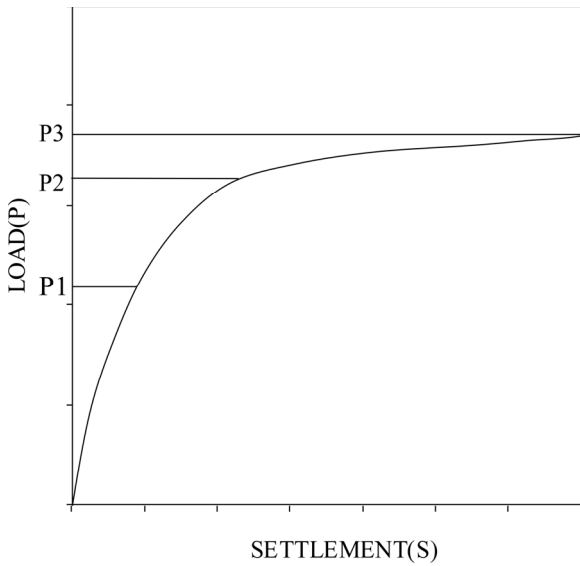


Fig. 4. Yielding load & Ultimate load

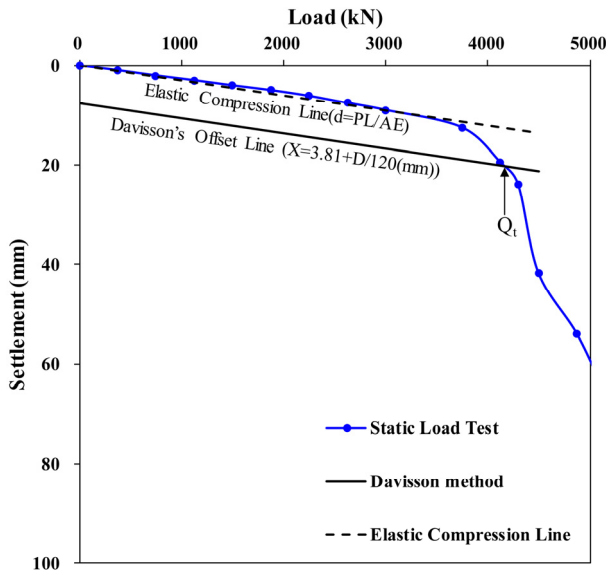


Fig. 5. Example of Davisson method (1972)

하중 P3 가 극한하중이 된다. 곡선부가 현저하게 구부러질 때의 최대 곡선을 나타내는 점의 하중 P1을 항복 하중으로 한다.

본 연구에서는 매입말뚝의 극한상태를 확인하기 위하여 현장재하시험을 현장조건에서 가능한 최대의 하중으로 재하를 하였으며, 그때의 최대하중을 극한하중으로 판단하였다. 그리고, 동재하시험과 정재하시험의 허용지지력을 비교하기 위하여 Davisson(1972) 방법을 사용하였으며, 이는 많은 재하시험 결과로부터 말뚝두부의 침하가 말뚝의 탄성변형과 선단지반의 탄성변형의 합보다 크면 파괴가 일어난다고 제안하였다. 이 한계 하중은 말뚝두부 하중에 대한 탄성압축량 직선을 산정한 후 이 직선에 말뚝직경에 따른 상수값을 더한 만큼의 평행이동선을 구하여 하중-침하량 곡선과의 교차점을 찾으려 된다. 이때의 상수값은 직경이 600mm 미만이면 $3.81+D/120(\text{mm})$, 직경이 600mm 이상인 말뚝은 $3.81+D/30(\text{mm})$ 이다(Fig. 5).

3. 시험결과 및 분석

정재하시험은 각 14 본의 말뚝에 대해서 실시하였으며, 결과는 Table 5, 6, 7, 8과 같다. 정재하시험의 결과는 하중전이 분석을 통해서 주면과 선단을 분리하여 지지력을 정리하였으며, 동재하시험과 비교 분석을 위하여 Davisson 판정법을 이용하여 극한지지력을 나타내었다. 극한지지력은 A 현장이 여타 다른 현장에 비해 지지력이 크게 나온 것을 확인할 수 있는데 이는 Table 4에 나타난 주면지반의 평균 N치 값과 비례하는 경향을 보였다. 그리고 하중전이분석을 통한 주면마찰력과 선

Table 5. A site field static load test result

Test pile number	Yield strength or breaking load (kN)			
	Ultimate skin bearing capacity	Ultimate base bearing capacity	All ultimate bearing capacity	Davisson
Test-1	1840	3310	5150	4125
Test-2	2250	3380	5630	4250

Table 6. B site field static load test result

Test pile number	Yield strength or breaking load (kN)			
	Ultimate skin bearing capacity	Ultimate base bearing capacity	All ultimate bearing capacity	Davisson
Test-3	1790	840	2630	2000
Test-4	1490	950	2440	1900
Test-5	1840	2290	4130	3700
Test-6	1050	820	1875	1650

Table 7. C site field static load test result

Test pile number	Yield strength or breaking load (kN)			
	Ultimate skin bearing capacity	Ultimate base bearing capacity	All ultimate bearing capacity	Davisson
Test-7	1070	1230	2300	2000
Test-8	1490	1880	3375	2850
Test-9	1340	2420	3760	1950
Test-10	1750	1630	3380	3000
Test-11	1700	1000	2700	2300
Test-12	2080	1070	3150	2700

Table 8. D site field static load test result

Test pile number	Yield strength or breaking load (kN)			
	Ultimate skin bearing capacity	Ultimate base bearing capacity	All ultimate bearing capacity	Davisson
Test-13	2551	1574	4125	2950
Test-14	3817	1183	5000	3900

단지지력의 전체지지력에서의 비율을 고려한 결과, 주변마찰력이 전체 지지력에 50% 이며, 선단지지력은 50%를 차지하는 것으로 확인되었다. 이는 강관 매입말뚝에서의 거동이 선단지지력과 주변마찰력이 비슷한 것으로 확인할 수 있다.

동재하시험의 경우 매입말뚝 시공 후 시멘트풀이 양생 완료되기 전에 실시한 초기동재하시험(EOID) 14회와 시멘트풀이 양생 되고 난 뒤에 실시한 재항타동재하시험(Restrike) 14회의 결과는 Table 9, 10, 11, 12와 같다.

동재하시험은 충분한 타격력을 통하여 타격에너지가 선단부까지 전달되어야 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다. 간혹, 동재하시험에 있어서 타격력이 약하면 시멘트풀의 양생정도에 따라서 주변에서 타격력이 전부 흡수되고 선단까지 에너지가 전달되지 않아 충분한 지지력을 산정하지 못하는 경우가 있다. 따라서, 타격에너지가 선단부까지 충분히 전달되는지의 여부는 CSB 값으로 확인이 가능하며, CSB(Compression Stress Bottom)가 적어도 30MPa 정도 되어야 하는 것으로 알려져 있다(Park

Table 9. A site field dynamic load test result

Test pile number	Test type	CAPWAP analysis result (kN)						Note
		Skin friction force	Base bearing capacity	Total bearing capacity	Davisson (Allowable bearing capacity)	CSX (MPa)	CSB (MPa)	
Test-1	EOID	329	2940	3269		189.6	191.1	16.01.22
	Restrike	2643	1046	3689	3610	203.5	143.6	16.04.06
Test-2	EOID	484	1046	3095		163.6	203.2	16.01.22
	Restrike	2551	1060	3611	3600	217.6	127.2	16.04.06

Table 10. B site field dynamic load test result

Test pile number	Test type	CAPWAP analysis result (kN)						Note
		Skin friction force	Base bearing capacity	Total bearing capacity	Davisson (Allowable bearing capacity)	CSX (MPa)	CSB (MPa)	
Test-3	EOID	484	1046	3095		143.2	99.3	16.07.06
	Restrike	2551	1060	3611	1800	185.1	53.0	16.10.06
Test-4	EOID	47	765	812		141.7	93.7	16.07.06
	Restrike	442	860	1302	1100	181.9	37.6	16.10.06
Test-5	EOID	336	2346	2682		218.3	151.3	16.07.06
	Restrike	875	2012	2887	2700	186.2	-	16.10.06
Test-6	EOID	77	1045	1122		122.0	73.7	16.07.06
	Restrike	407	867	1274	1274	148.9	3.0	16.10.06

Table 11. C site field dynamic load test result

Test pile number	Test type	CAPWAP analysis result (kN)						Note
		Skin friction force	Base bearing capacity	Total bearing capacity	Davisson (Allowable bearing capacity)	CSX (MPa)	CSB (MPa)	
Test-7	EOID	318	951	1269		175.0	89.6	16.10.12
	Restrike	1242	936	2178	1800	182.1	94.8	17.02.10
Test-8	EOID	317	2469	2785		212.9	159.5	16.10.12
	Restrike	1553	1147	2700	2700	191.6	168.8	17.02.10
Test-9	EOID	219	834	1053		112.4	68.1	16.10.12
	Restrike	1170	1212	2382	1800	209.2	133.4	17.02.10
Test-10	EOID	133	2423	2556		200.3	141.8	16.10.12
	Restrike	1426	1456	2882	2700	214.0	129.3	17.02.10
Test-11	EOID	240	754	994		87.9	47.6	16.10.12
	Restrike	1876	868	2743	2300	206.8	106.1	17.02.10
Test-12	EOID	285	2478	2762		183.5	148.8	16.10.12
	Restrike	1487	951	2438	2300	175.8	96.0	17.02.10

Table 12. D site field dynamic load test result

Test pile number	Test type	CAPWAP analysis result (kN)						Note
		Skin friction force	Base bearing capacity	Total bearing capacity	Davisson (Allowable bearing capacity)	CSX (MPa)	CSB (MPa)	
Test-13	EOID	130	2337	2467		212.0	96.7	16.11.17
	Restrike	1203	1659	2862	2200	215.9	180.1	17.08.30
Test-14	EOID	81	2269	2350		209.7	141.5	16.11.17
	Restrike	930	3194	4125	4125	235.6	251.2	17.08.30

et al., 2004).

Table 9, 10, 11, 12의 확인결과 대부분의 CSB 결과값은 30MPa 이상의 값을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 타격에너지가 선단부까지 충분히 전달되는 것을 확인하였다.

CSX(Maximum Compressive Stress)의 경우 대부분의 결과값이 초기동재하시험 보다 재항타동재하시험 일 때 값이 크게 나타내었는데, 이는 주변 시멘트풀의 양생으로 주변마찰력이 발현 된 결과이다.

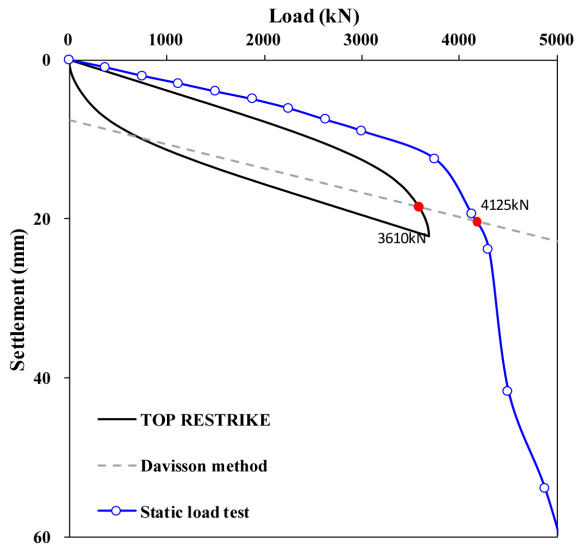
초기동재하시험(EOID)으로 산정된 지지력은 전체 지지력 대비 선단지지력의 평균값은 1,900kN 으로 88% 비율을 나타냈으며, 주변마찰력은 225kN 으로 12% 비율을 확인하였다. 선단지지력과 주변마찰력이 이렇게 큰 차이를 보이는 이유는 말뚝 시공 후에 수행하는 초기 동재하시험(EOID)은 선단지지력만 지지층에 의해 나타나지만, 주변의 시멘트풀은 양생이 완료되지 않아 주변 마찰력은 발현이 되지 않기 때문이다. 반면, 재항타동재하시험(Restrike) 결과 초기동재하시험(EOID) 결과와 다른 경향을 보였으며, 주변마찰력과 선단지지력의 비가 50% : 50%로 나타나 전체지지력에 대한 지지력 비가

비슷하게 나타났다. 이는 정재하시험을 수행한 후 일정 시간 이후에 수행되는 재항타동재하시험(Restrike)의 특성상 주변마찰력의 발현으로 인한 결과로 판단된다. 따라서, 강관매입말뚝의 경우 정재하시험과 동재하시험의 지지력 평가는 재항타동재하시험(Restrike)의 결과값을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

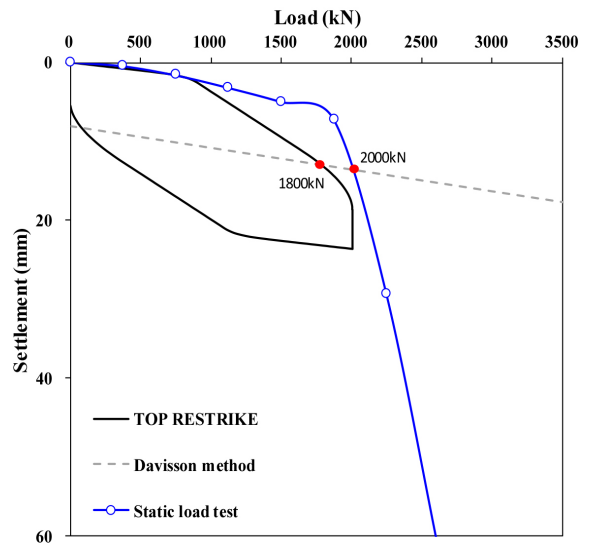
3.2 재하시험 결과 비교·분석

3.2.1 지지력 분석

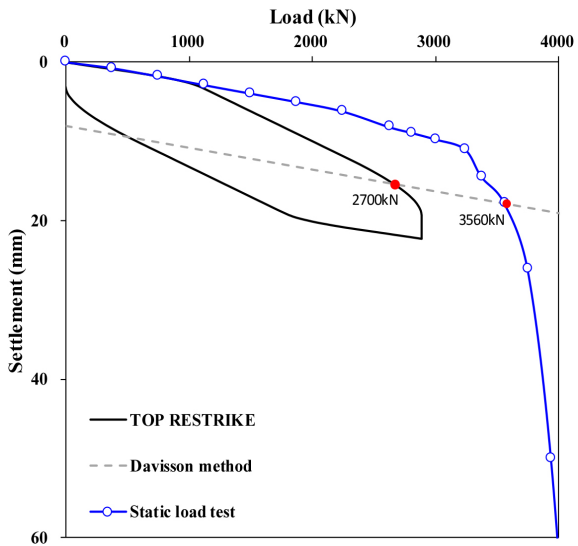
현장에서 실시한 동재하시험 및 정재하시험의 극한 지지력을 분석하였으며(Fig. 6, Table 13), Fig. 6은 정재하시험 결과와 재항타동재하시험(Restrike)의 결과를 함께 나타낸 것이다. 그리고, 설계 시 사용할 수 있는 허용 지지력을 산정하기 위하여 Davisson 판정법을 이용하여 극한지지력을 함께 나타내었다. 이때, 재항타동재하시험의 하중-침하곡선은 두부에서의 결과값을 이용하였다. Table 13의 결과 정재하지지력 평균 값은 3,546kN 이며, 재항타동재하지지력 평균 값은 2,673kN으로 정재하지지력이 약 32% 높게 나타났다. 또한 정재하지지력



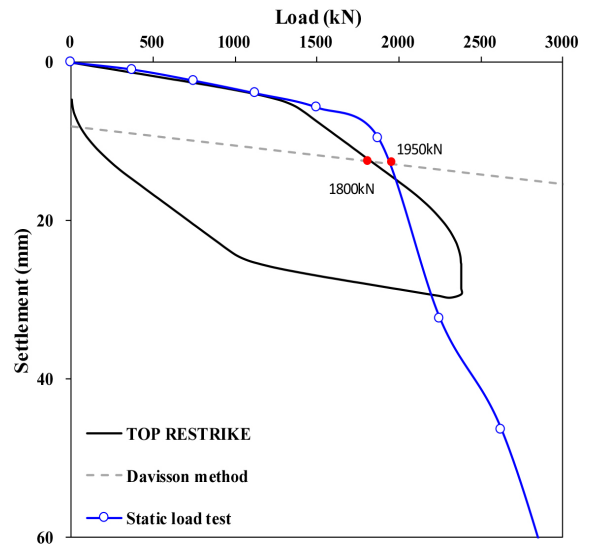
(a) Test-1



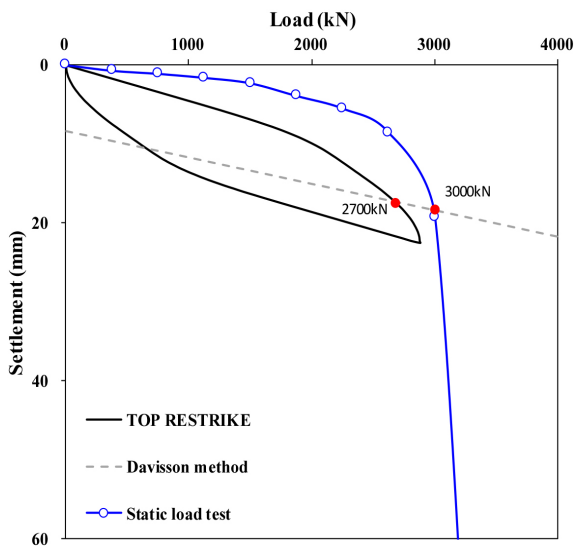
(b) Test-3



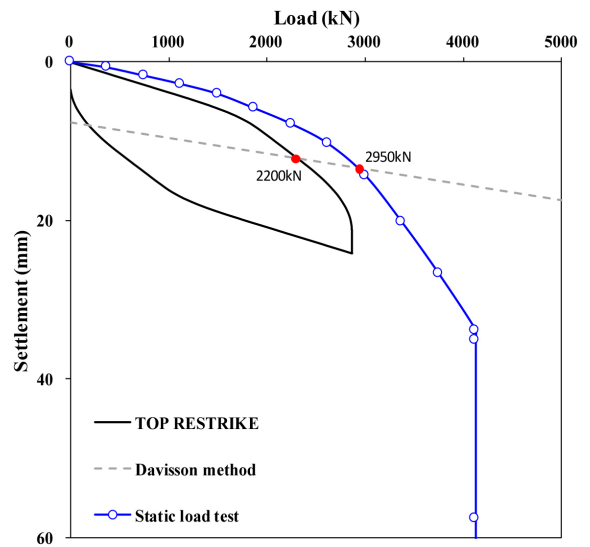
(c) Test-4



(d) Test-9



(e) Test-10



(f) Test-14

Fig. 6. Field load test (Restrike and static load test) comparison of results

Table 13. Summarized test results

Test pile number		Total bearing capacity (kN)		Davisson method (kN)	
		Static load test	Dynamic load test	Static load test	Dynamic load test
A site	Test-1	5,150	3,689	4,125	3,610
	Test-2	5,630	3,611	4,250	3,600
B site	Test-3	2,630	2,004	2,000	1,800
	Test-4	2,440	1,640	1,900	1,100
	Test-5	4,130	2,887	3,700	2,700
	Test-6	1,875	1,274	1,650	1,274
C site	Test-7	2,300	2,178	2,000	1,800
	Test-8	3,375	2,700	2,850	2,700
	Test-9	3,760	2,382	1,950	1,800
	Test-10	3,380	2,882	3,000	2,700
	Test-11	2,700	2,743	2,300	2,300
D site	Test-12	3,150	2,438	2,700	2,300
	Test-13	4,125	2,862	2,950	2,200
	Test-14	5,000	4,125	3,900	4,125
Average		3,546	2,673	2,805	2,429

(Davisson 판정법) 평균 값이 2,805kN으로 재항타동재 하지지력(Davisson 판정법) 평균 값은 2,429kN 보다 약 14% 높게 나타났다. 동재하지지력과 정재하지지력의 차이가 크게 나타난 이유는 재항타동재하시험의 선단 지지력이 정재하시험의 선단지지력 보다 약 26% 감소한 데서 기인한다. 이는 주변 시멘트풀의 양생에 의해 재항타동재하 시 타격에너지가 선단부까지 충분히 전달되지 않았기 때문이다. 또한, 정재하시험 및 동재하시험으로 판정된 지지력은 시험시간이 재하시험결과값에 영향을 미친다는 기존의 연구결과(Kim et al., 2016)처럼 본 연구에서도 이러한 영향이 있었다고 판단되며, 마지막으로, 정재하시험이 끝난 후 수행되는 재항타동재하시험은 재하시험과정에서 발생할 수 있는 선단부의 슬라임이나 품질관리 문제 및 경타로 인한 선단지반의 이완으로 선단지지력이 충분히 발휘되지 못해 지지력 차이가 크게 발생하였다고 판단된다.

3.2.2 안전율 분석

말뚝의 설계를 위해서 지지력 예측은 중요한 요소이다. 하지만, 시간적 제약과 경제적 원인으로 매번 정재하시험을 수행할 수 없는 실정이다. 현재 실무에서는 지지력 예측 및 품질관리 측면으로 정재하시험 보다는 동재하시험의 결과를 빈번하게 사용하고 있다. 이때 재항타동재하시험을 통해 허용지지력을 도출하는 방법은 CAPWAP 분석방법을 통한 도출된 지지력 값에 안전율

2.5를 사용하는 방법과 하중-침하곡선에서의 Davisson 판정법을 이용하여 안전율 2.0을 적용하는 방법이 있다.

기존의 안전율(F.S = 2.0)을 이용한 Davisson 판정법의 결과 4개 지역 14본의 말뚝의 지지력 비의 평균은 0.86으로 정재하시험과 동재하시험의 지지력차이 15%를 확인하였다. 이는 동재하시험을 이용한 결과를 사용하였을 경우 정재하시험 때보다 보수적인 결과인 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 보수적인 결과를 보정하기 위하여 동재하시험 시 안전율을 수정 제안하였다. 정재하시험과 동재하시험의 지지력 비율이 1.0 이 되면 동재하시험 지지력을 이용하여 정재하시험을 수행한 결과처럼 예측할 수 있다. 안전율을 변화시켜 지지력 비율을 1.0이 될 때의 값을 도출하였다. 그 결과는 Fig. 7 과 같이 나타났으며, 동재하시험과 정재하시험의 지지력비율이 1.0에 도달 할 때의 안전율은 1.75 로 확인하였다(Table 14). 이는 기존 안전율 2.0과 비교하면, 15% 증가하였다. 또한, 제안한 안전율을 적용한 재하시험의 결과 값의 차이를 보다 체계적으로 분석하고자 시험 값들을 통계 분석하여 신뢰도 및 상관관계를 검토하였다(Fig. 8, Table 15). Table 15에서 안전율을 적용하지 않은 전체 하중의 경우 신뢰도는 0.77이며, 변동계수(Coefficient of Variation)는 0.15를 나타내어 재하시험 결과값의 보정이 필요한 것으로 확인하였다. 그러므로 안전율을 적용하여 신뢰도 검토를 수행하였으며, 기존 안전율(2.0)

을 적용하였을 경우의 동재하시험(Davisson) 및 정재하시험(Davisson)의 신뢰도는 0.86으로 나타내고 변동계수(COV)는 0.15를 나타내었다. 이는 기존의 항타말뚝

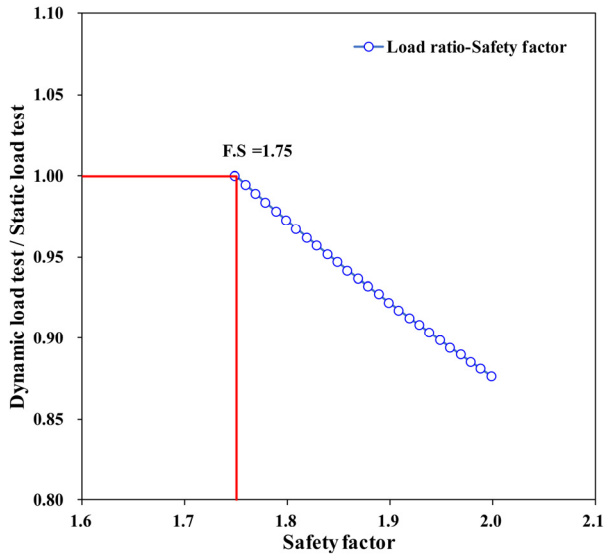


Fig. 7. Safety factor and ratio of dynamic load test and static load test correlation

에 대한 타 연구의 신뢰도(평균 : 0.97, Garland Links & Frank Rausche, 2004, 평균 : 0.91, Park, 2017)보다 낮은 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 안전율(1.75)을 적용하였을 경우 변동계수(COV)는 0.15로 비슷하였지만, 신뢰도가 0.98로 나타나 신뢰도 측면에서 크게 향상되는 것으로 나타났다.

수정 제안한 안전율은 동재하지지력이 정재하지지력에 근접하지만 이를 실무에서 사용하기 위해서는 슬라임의 발생 및 시멘트풀 일수 현상 등을 고려하여 품질관리가 철저히 고려되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 강관 매입말뚝 현장에 대해 동재하시험(EOID 14회, Restrike 14회)과 정재하시험(14회)을 실시하여 지지력 분석 및 비교를 하였으며, 동재하시험의 안전율을 제안하였다. 본 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

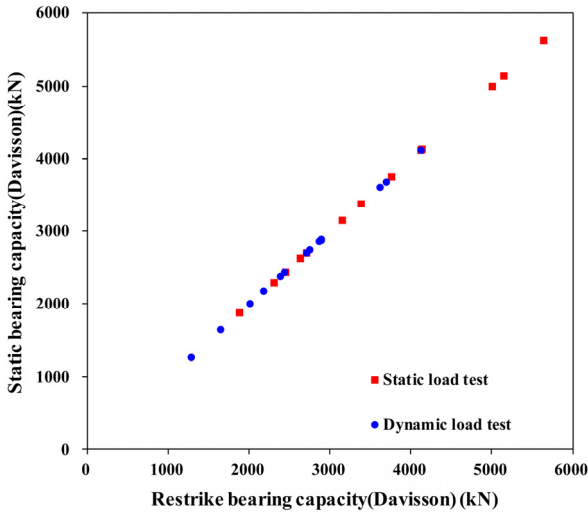
Table 14. Applied of modified safety factor

Test pile number	Davisson method (kN)		Applied F.S = 1.75		Ratio	
	Static load test	Dynamic load test	Static load test	Dynamic load test	DLT/SLT	
A site	Test-1	4,125	3,610	2,063	2,063	1.00
	Test-2	4,250	3,600	2,125	2,057	0.97
B site	Test-3	2,000	1,800	1,000	1,029	1.03
	Test-4	1,900	1,100	950	629	0.66
	Test-5	3,700	2,700	1,850	1,543	0.83
	Test-6	1,650	1,274	825	728	0.88
C site	Test-7	2,000	1,800	1,000	1,029	1.03
	Test-8	2,850	2,700	1,425	1,543	1.08
	Test-9	1,950	1,800	975	1,029	1.05
	Test-10	3,000	2,700	1,500	1,543	1.03
	Test-11	2,300	2,300	1,150	1,314	1.14
	Test-12	2,700	2,300	1,350	1,314	0.97
D site	Test-13	2,950	2,200	1,475	1,257	0.85
	Test-14	3,900	4,125	1,950	2,357	1.21
Average	2,805	2,429	1,403	1,388	1.00	

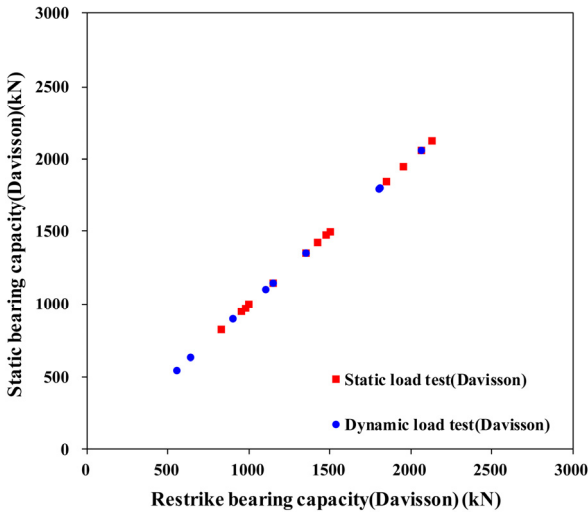
Table 15. Coefficient of variation and ratio of load test results

Type	Reliability	Number of times	Coefficient of variation
Dynamic load test/Static load test (Total)	0.77	14	0.15
Dynamic load test/Static load test (Davisson) - Applied F.S 2.0	0.86	14	0.15
Dynamic load test/Static load test (Davisson) - Applied F.S 1.75	0.98	14	0.15

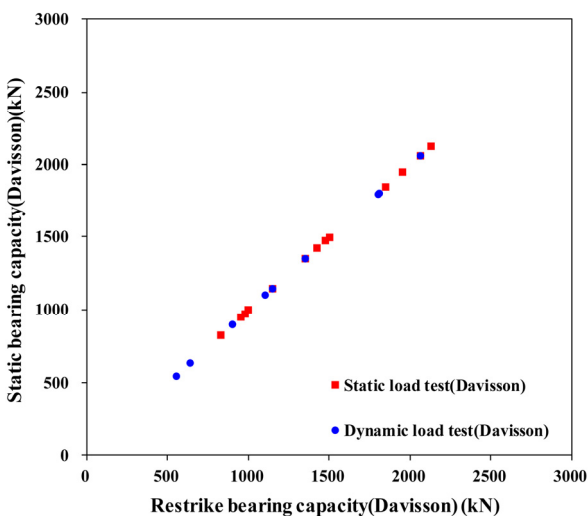
* Coefficient of variation (COV) = 1) COV < 25% : Low, 2) 25% ≤ COV < 40% : Normal, 3) 40% ≤ COV : high



(a) Total Bearing capacity of static and bearing capacity of dynamic load test



(b) Davisson (Bearing capacity of static and bearing capacity of dynamic load test) - Applied F.S = 2.0



(c) Davisson (Bearing capacity of static and bearing capacity of dynamic load test) - Applied F.S = 1.75

Fig. 8. Comparison of bearing capacity correlation of load test

- (1) 강관 매입말뚝의 정재하시험 결과 전체지지력에 대한 주변마찰력과 선단지지력의 평균 비율은 50% : 50% 로 주변마찰력과 선단지지력의 발현 비율이 비슷한 것으로 나타났다.
- (2) 초기동재하시험(EOID)의 주변마찰력과 선단지지력의 평균 비율은 10% : 90%의 비율을 보였으며, 재항타동재하시험(Restrike)의 경우 50% : 50%의 비율을 보였다.
- (3) 극한지지력 판정법은 현장에서 가장 빈번하게 쓰이는 Davisson 판정법으로 수행하였으며, 그 결과, 정재하시험 대비 재항타동재하시험은 약 15% 낮게 나타났다.
- (4) 재하시험 결과를 Davisson 판정법을 이용하여 항타말뚝 등의 허용지지력을 산정할 때 안전율 2.0을 사용하나 본 연구에서 정재하시험이 동재하시험 보다 약 15% 큰 것으로 나타나, 강관 매입말뚝의 동재하시험 결과를 현실화 시키기 위해 기존의 안전율 2.0을 1.75로 제안한다. 수정 제안한 안전율을 보다 체계적으로 분석하고자 신뢰도 및 상관관계를 검토하였다. 수정 제안한 안전율은 동재하시험이 정재하시험에 근접하지만 이를 실무에서 사용하기 위해서는 품질관리가 철저히 이루어 져야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원 과 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030040)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Garland Likins. and Frank Rausche. (2004), CORRELATION OF CAPWAP WITH STATIC LOAD TESTS.
2. Goble, G. G., Rausche, F., and Likins, G. (1980), The analysis of pile driving-A state-of-the art. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Application of Stresswave Theory to Piles. Balkema, Stockholm Sweden.
3. Linkis, G. E., Rausche, F., Thendean, G., and Svinikin, M. (1996), CAPWAP Correlation Studies. Proc. of the 5th Int'l Conf. on the Application of Stresswave Theory to Piles. University of Florida, Orlando Florida USA.
4. Park, J. B. (2017), "A Comparative Study on the Bearing Capacity of Dynamic Load Test and Static Load Test of PHC Bored Pile", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.18, No.9,

- pp.19-31.
5. Kim, J. H. and Yea, G. G. (2013), "Case Study of Comparative Analysis between Static and Dynamic Loading Test of PHC Pile", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.14, No.11, pp.13-23.
 6. American Society for Testing and Materials (1994), Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load (ASTM D1143), ASTM, West Conshohocken, pp.60-68 (in Korean).
 7. Park, J. B. (2004), "Estimation of Bearing Capacity of SIP Pile Installed by Improved Criteria", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.5, No.3, pp.5-15.
 8. Park, J. B. (2004), "Strength and Friction Behavior Cement paste poured in the Bored Pile", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.5, No.3, pp.31-39.
 9. Park, Y. H. (2004), A Study of Design and Construction of SIP Method. *Korea Expressway Corporation Research Institute*, pp. 138-152, pp.347-365.
 10. Lee, C. H., Lee, W. J., Jeong, H. J., and Han, S. I. (2005), "Evaluation of Point Bearing Capacity Using Field Model Pile Test", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.6, No.3, pp.47-54.
 11. Hong, W. P., Lee, J. H., and 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 Geo-Environmental Society*, Vol.24, No.5, pp.37-54.
 12. Hong, W. P. and Chai, S. G. (2007), "Estimation of End Bearing Capacity of SDA Augered Piles on Various Bearing Stratum", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.5, pp. 111-129.
 13. Hong, W. P. and Chai, S. G. (2007), "Estimation of Frictional Capacity of SDA Augered Piles in Various Ground", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.4, pp.279-292.
 14. Shin, B. W. and Lee, J. D. (2000), "Field Model Test on Uplift Capacity of Bored Pile in Weathered Granite Soil", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.20, No.5, pp.441-451.
 15. Jung, H. S., Lim, H. S., and Kim, J. S. (2003), "Suggestion of Evaluation Formula for Skin Resistance of SIP", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.4, No.1, pp.59-66.
 16. Cho, C. W., Kim, H. M., and Kim, W. K. (2004), "Bearing Capacity Evaluation of the Drilled Shaft Using Small Scale Model Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.5, pp. 117-126.
 17. Hosseini, M. A. and Rayhani, M. (2017), Evolution of pile shaft capacity over time in marine soils, *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.8, No.12.

Received : December 29th, 2017

Revised : April 6th, 2018

Accepted : April 20th, 2018