

# 사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축지지력 산정도표 및 산정공식 개발에 관한 연구(I) - 재하시험 자료 분석을 통한 전체지지력에 대한 주면마찰력의 분담율(SRF) 분석 -

## Study(I) on Development of Charts and Formulae Predicting Allowable Axial Bearing Capacity for Prebored PHC Pile Socketed into Weathered Rock through Sandy Soil Layer - An Analysis of Sharing Ratio of Skin Friction to Total Bearing Capacity (SRF) by Analyzing Pile Load Test Data -

최 용 규 <sup>1</sup>	Choi, Yongkyu	이 원 제 <sup>2</sup>	Lee, Wonje
이 창 옥 <sup>3</sup>	Lee, Chang Uk	권 오 균 <sup>4</sup>	Kwon, Oh-Kyun

### Abstract

Based on pile load test results for various pile types that were constructed in-situ and pile design data of prebored PHC piles, the ratio of skin friction to total capacity (*SRF*) was analyzed. A *SRF* distribution range from the pile load test results for pilot test prebored PHC piles was 42~99% regardless of relative penetration lengths, soil types, and pile load test types. However, a *SRF* distribution range from the pile design data for prebored PHC piles was 20~53% regardless of relative penetration lengths and pile diameters. Also, a *SRF* distribution range from the restrike dynamic pile load test results for pretest working prebored PHC piles was a scattered range of 4~83% regardless of pile diameters, relative penetration lengths and soil types. The scattered *SRF* of pretest working piles was caused to the quality control issue on the filling of cement milk around piles and this quality control issue should be improved. The average *SRF* calculated by the current design method was estimated to be 2.2 times lower than the average *SRF* of the pilot test piles. It is because skin friction resistance is calculated at a very low level. Therefore, a new design method for skin friction will be proposed based on this study.

### 요 지

실제 시공된 말뚝들의 재하시험 자료 및 매입 PHC말뚝의 설계 자료로부터 전체지지력에 대한 주면마찰력의 분담율인 *SRF*를 분석하였다. 현장에서 시험 시공된 말뚝의 *SRF*는 말뚝의 종류, 상대근입길이, 지반의 종류, 재하시험의 종류에 상관없이 42~99%이었다. 매입 PHC말뚝에 대한 설계 자료에서 구한 *SRF*는 말뚝의 직경, 상대근입길이에

1 정희원, 경성대학교 공과대학 건설환경도시공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Environmental and Urban Engrg., Kyungsung Univ.)

2 정희원, ㈜유니콘기연 부사장 (Member, Vice President, Unicorn Technical Institute)

3 정희원, 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept of Civil Environmental Engrg, Kyungsung Univ.)

4 정희원, 계명대학교 공과대학 건축토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Keimyung Univ., Tel: +82-53-580-5165, Fax: +82-53-580-5280, ohkwon@kmu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2019 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상관없이 풍화암에 소켓된 경우 20~53%의 범위에 분포하였다. 사용말뚝으로 실제 시공된 매입 PHC말뚝에서 재항타 동재하시험 자료로부터 구한 *SRF*는 말뚝의 직경, 상대근입깊이, 지반의 종류에 상관없이 4~83%의 범위에 분산되어 분포하였다. 사용말뚝에서 *SRF*가 낮은 수준으로 나타나는 이유는 매입 PHC말뚝의 주면고정액의 충전이 제대로 이루어지지 않은 채 시공된 현황으로 볼 수 있었으며 따라서 주면고정액의 시공관리에서 시급하게 개선해야 할 현황이었다. 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝의 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식으로 계산한 주면마찰력의 *SRF*는 실제 현장 시공 말뚝의 *SRF*보다 평균적으로 2.2배 정도로 낮은 수준으로 평가되었다. 이는 설계에서 사용하고 있는 산정공식에 의한 극한주면마찰력이 매우 낮은 수준으로 계산되기 때문이다. 따라서 *SRF*를 만족시킬 수 있는 새로운 주면마찰력 산정공식의 제안 필요성이 있는 것으로 판단된다.

**Keywords :** Pile load test data analysis, Current design data analysis of prebored PHC pile, Sharing ratio of skin friction to total capacity (*SRF*), *SRF* of prebored PHC pile, Necessity of a new design method for skin friction

## 1. 서론

본 논문은 아래에 정리한 바와 같이 사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축 지지력 산정도표 및 산정공식을 제안하는 연구에 대한 일련의 연속논문 중 제1편에 해당한다.

사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축지지력 산정도표 및 산정공식 개발에 관한 연구(I~VII)

- 제1편 재하시험 자료 분석을 통한 전체지지력에 대한 주면마찰력의 분담율(*SRF*) 분석 -
- 제2편 설계 사례 분석을 통한 매입 PHC말뚝의 설계 개선 방향 -
- 제3편 품질 성능 검사 자료 및 성능 제원 표 분석을 통한 PHC말뚝의 장기허용압축하중 성능의 올바른 활용 -
- 제4편 압축정재하시험 및 양방향재하시험 자료 분석을 통한 매입 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 실증 성능 검증 -
- 제5편 매개변수 수치해석 자료 분석 -
- 제6편 지반의 허용압축지지력 산정용 표해 및 도해 -
- 제7편 지반의 허용압축지지력 산정공식 -

말뚝기초는 연직압축하중을 지지하는 방식에 따라 구분할 수 있다. 주면마찰력 성분 또는 선단지지력 성분 중 어느 한쪽이 지배적으로 발현될 경우에는 마찰지지말뚝 또는 선단지지말뚝으로 구분할 수 있으며(Kim et al., 2013), 이들 성분이 각각 상당한 정도로 발현되어 연직압축하중을 지지하는 경우에는 혼합(마찰+선단)지지말뚝으로 구분할 수 있다. 대부분의 말뚝기초에서 연직압축하중의 대부분은 주면마찰력에 의해 지지되며 사용하중 범위에서는 이러한 경향은 더욱 우세하게 나타난다(Tomlinson, 1994). 즉 특별한 경우를 제외하면 주

면마찰력이 연직압축하중의 대부분을 부담하게 된다.

말뚝의 재하시험으로는 정재하시험, 양방향재하시험, 정·동재하시험, 동재하시험(대표적 시험방법 예, PDA) 등이 적용되어 왔으나 이 중 정·동재하시험은 국내에서 현 시점에서는 사용되지 않고 있다. 이들 재하시험에서 측정 또는 분석에 의하여 말뚝머리하중-침하량 곡선을 구할 수 있다. 국내에서 말뚝재하시험은 설계하중 확인 목적으로 매우 많이 시행되어 왔으나 본격적인 말뚝재하시험은 서해대교 건설공사에서 실시되었다. 1995년경 서해대교 건설공사에서 대구경 현장타설말뚝에 대하여 정재하시험, 정·동재하시험, 동재하시험으로 연직압축 정재하시험을 실시하였으나 연직축하중전이 측정은 실시되지 않았다.

압축정재하시험 및 양방향재하시험에서 주면마찰력의 연직압축하중의 분담 정도는 말뚝에 축하중 계측용 센서를 설치하여 연직축하중을 측정하여 알아낼 수 있다. 국내에서 연직축하중전이 측정은 1997년경 남항대교 실시설계 시 직경 500mm 직항타강관말뚝에 대하여 처음으로 실시되었다(Choi, 1997). 현장타설말뚝에 대한 연직축하중전이 측정은 1999~2000년경 광안대교 건설공사 중 기초의 안전성 확인을 목적으로 직경 1,000mm의 축소 현장타설말뚝에서 처음으로 실시되었다(Choi, 2000). 양방향재하시험 시 연직하중전이 측정은 2001년경 수영3호교 건설공사 시 직경 1,000mm의 현장타설말뚝에서 처음으로 실시되었다(Choi, 2001). 매입 PHC말뚝에 대한 연직축하중전이 측정은 2017년경 직경 500mm 및 600mm에 대하여 처음으로 실시되었으며(Choi et al., 2017) 매입 강관말뚝에 대한 연직축하중전이 측정은 2016~2017년 직경 500mm에 대하여 처음으로 실시되었다

(KGS, 2016; KGS, 2017a; KGS, 2017b; G-Tech, 2017).

연직축하중전이 측정을 실시하지 않더라도 양방향재하시험에서는 주면마찰력과 선단지지력을 분리할 수 있는데 이 때 최대재하하중 시 기준변위에서 주면마찰력을 분리할 수 있다. 기준변위는 최대재하하중 시 상향변위 또는 하향변위 중 작게 발생된 변위로 정의한다. 국내에서는 양방향재하시험으로 국외 기술인 O-cell시험이 먼저 도입되어 실시되었으며 국내 기술로는 2002년 경 수영3호교 건설공사에서 처음으로 실시되었다(Choi, 2001). 그리고 매입 PHC말뚝에 대한 양방향재하시험은 2017년에 처음으로 실시되었다(SGS, 2017).

연직축하중전이 측정 자료는 흔하지 않으나 이들 자료를 분석하면 말뚝기초의 연직압축하중 지지 개념을 구명할 수 있다. 이 연구에서는 국내에서 실시된 연직축하중전이 측정 자료와 양방향재하시험 자료들을 분석하였으며 이에 기초하여 전체지지력에 대한 주면마찰력의 분담율(*SRF*: Sharing ratio of skin friction to total capacity)을 연구하였다. 또한 매입 PHC말뚝 및 매입 강관말뚝에 대한 재항타 동재하시험 자료 그리고 매입 PHC말뚝 설계 자료를 분석하여 *SRF*를 중심으로 고찰하였다.

## 2. 시공된 말뚝에 대한 말뚝재하시험 자료 분석을 통한 *SRF* 분석

### 2.1 분석 대상 사례 및 분석 개요

Table 1에는 이 연구의 분석에 사용한 대상 말뚝들의 개요를 나타내었다. 여기에는 말뚝 종류, 재하시험방법, 대상 사례 수량, 말뚝 직경, 근입길이, 선단부 소켓 지반의 종류, 선단부 소켓길이 등을 나타내었다. 또한 시험 말뚝은 시험 사용말뚝(*Pretest working pile*)과 순수 시험용 말뚝(*Pilot test pile*)으로 구분하여 나타내었다. Table 1에 요약된 대상 말뚝들의 분석 개요를 부록(Table A.1 및 참고문헌)으로 정리하였으며 부록 및 참고문헌 전문은 편집위원회의 의견에 따라 학회에 보관되어 있다.

압축정재하시험에서는 하중전이 측정을 실시한 사례를 분석에 활용하였으며 대상 말뚝 개수는 직항타 강관말뚝 20개, 현장타설말뚝 75개(정재하시험 5개, 양방향재하시험 70개), 매입 PHC말뚝 4개 그리고 매입 강관말뚝 20개이었다. 이 중 전자 2종류는 시험사용말뚝이었고 후자 2종류는 순수 시험용 말뚝이었다. 최대재하하중 단계에서 주면마찰력과 선단지지력을 구분하였다.

양방향 재하시험에서는 하중전이 측정을 하지 않더라도 최대재하하중 단계의 기준변위에서 주면마찰력 성분과 선단지지력 성분을 구할 수 있으므로 이 자료도 분석에 활용하였다. 국내에서 실시된 양방향 재하시험 사례 중에서 현 단계에서 확보된 자료들을 대상 사례로 활용하였으며 현장타설말뚝 24개 그리고 매입 PHC말뚝 19개가 포함되었다. 이들 말뚝은 순수 시험용 말뚝이었다.

동재하시험에서도 축하중 측정용 센서를 설치하지 않더라도 최대재하하중 단계에서 주면마찰력 성분과 선단지지력 성분을 분석할 수 있으므로 재항타 동재하시험 자료를 활용하였다. 국내에서 실시된 재항타 동재하 사례 중에서 현 단계에서 확보된 자료들을 대상 사례로 활용하였으며 매입 PHC말뚝 226개, 매입강관말뚝 11개가 포함되었다. 매입 PHC말뚝 중 47개는 순수 시험용 말뚝이었고 179개는 시험사용말뚝이었으며 매입강관말뚝 11개는 시험사용말뚝이었다.

매입말뚝의 경우 주면저항력은 지반의 종류에 따라 발현 정도의 차이가 크다. 따라서 매입말뚝의 주면저항력의 분석은 지반 종류에 의한 영향이 반드시 고려되어야 한다. 그러나 본 연구에서 수집된 재하시험 자료들에서는 다음과 같은 한계가 있었다. 지반조사 보고서를 구할 수 없는 사례가 많았는데 특히 Table A.1의 B-P-RE-(G2)의 경우 동재하시험 보고서만 수집되었다. 점성토의 경우에도  $c_u$ 값은 나타나 있지 않은 경우가 대부분이며 N치만 나타나 있었다. 설계 자료의 분석에 의하면 말뚝 선단이 소켓된 풍화암 지반의 두께는 대체로 1.0m 내·외이었다. 수집된 자료들에서 상기와 같은 한계가 있었으므로 본 연구에서는 지반의 종류에 따른 개별 지층에서 발현된 주면마찰력의 크기를 분석하지는 못하였으며 지중 근입지층(사질토 또는 점성토, 풍화암 소켓지층) 전체에 걸쳐서 발현된 주면마찰력의 전체 크기를 분석하였다. 즉 전체 주면마찰력 및 선단지지력을 분리하여 분석하였다.

Table 1에 분석한 내용에 기초하여 모든 대상 사례 말뚝들의 *SRF*를 Fig. 1에 나타내었으며 다음과 같이 분석할 수 있었다. 매입 PHC말뚝[압축정재하시험, 양방향재하시험, 재항타 동재하시험(G1)], 매입 강관말뚝(압축정재하시험), 직항타강관말뚝(압축정재하시험), 대구경 현장타설말뚝(압축정재하시험, 양방향재하시험)의 순수 시험용 말뚝 사례들에서는 *SRF*가 36~95%의 범위에 분포하였다. 그러나 사용말뚝인 매입 PHC말뚝의 재항타 동재하시험 사례(G2)에서는 *SRF*가 4~83%의 범위에 걸쳐 분산되어 분포하였으나 순수 시험용 말뚝에 비하여 낮은

수준이었다. 여기서 G1은 매입 PHC의 순수 시험용 말뚝 1개 및 주변 반력말뚝 8개 등 9개가 1조로 시공되었으며 이러한 순수 시험용 말뚝이 4조로 시험시공 되었다. 이 경우 주변고정액을 확실하게 충전하기 위하여 시간차를 두면서 2~3회 반복 주입을 실시하였고 시공 후 말뚝체를 확인한 결과 매우 양호하게 시공된 것으로 판단되었다. 이들 말뚝들은 연구자들이 주변고정액의 충전 시공

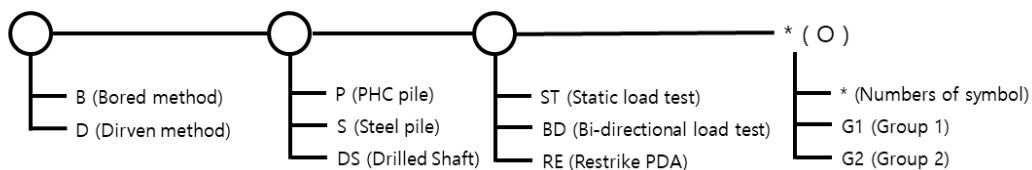
관리를 담당하였다. G2는 시험사용말뚝이었으며 1회 주변고정액을 충전하였고 말뚝 시공자가 주변고정액의 시공 관리를 담당하였다. 시공 후 일정기간이 지난 후 동재하시험을 실시하였다. 매입 PHC말뚝의 재항타 동재하시험(G2그룹)에서는 SRF가 넓은 범위에 분포하였다.

아래에서는 재하시험 종류에 따른 매입 PHC말뚝, 매입 강관말뚝, 직항타 강관말뚝, 대구경 현장타설말뚝에

Table 1. Pile Information for SRF Analysis

Pile Types	Pile Load Testing Methods	Measuring Load Distribution	Quantity (QTY.)		Penetration Depth (m)	Socketing Layer	Remarks	Kind of test pile								
			Total	Pile Diameter (mm)												
Prebored PHC Piles	Static Compressive Pile Load Tests	O	4	3 × 500 1 × 600	25.8~42.1	Weathered Rock	B-P-ST-*	Pilot test pile								
Prebored PHC Piles	Bi-directional Pile Load Tests	X	19	3 × 500 16 × 600	11.7~38.2	Weathered Rock	B-P-BD-*	Pretest working pile								
Prebored PHC Piles	PDA (Restrike)	X	47	36 × 500 11 × 600	20.2~42.2	Weathered Rock	B-P-RE-*(G1)	Pilot test pile								
				179					13 × 500 120 × 600 43 × 800 3 × 1,000	8.0~72.2	B-P-RE-*(G2)	Pretest working pile				
			Prebored Steel Piles		PDA (Restrike)	X	11	4 × 457 6 × 508 1 × 711	6.2~31.3				Weathered Rock	B-S-RE-*	Pilot test pile	
				Prebored Steel Piles				Static Compressive Pile Load Tests		O	20	14 × 457 6 × 508				14.2~33.9
Driving Steel Piles	Static Compressive Pile Load Tests	O										20				
			Drilled Shafts	Bi-directional Pile Load Tests	O(70개) X(24개)	94	5 × 1,500	18.7~42.9	Weathered Rock/Soft Rock	B-DS-ST-*	Pretest working pile					
							7 × 1,000									
							11 × 1,200									
1 × 1,274																
5 × 1,400																
16 × 1,500																
6 × 1,800																
28 × 2,000																
3 × 2,250																
12 × 2,500																
1 × 1,850																
1 × 3,000																

Remarks:

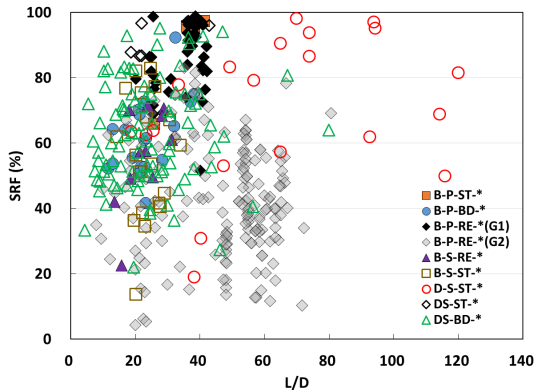


B (Bored method), P (PHC pile), ST (Static pile load test method), BD (Bi-directional pile load method), RE (restrike PDA), S (Steel pile), D (Driven method), DS (Drilled shaft), G1 (Group 1), G2 (Group 2)

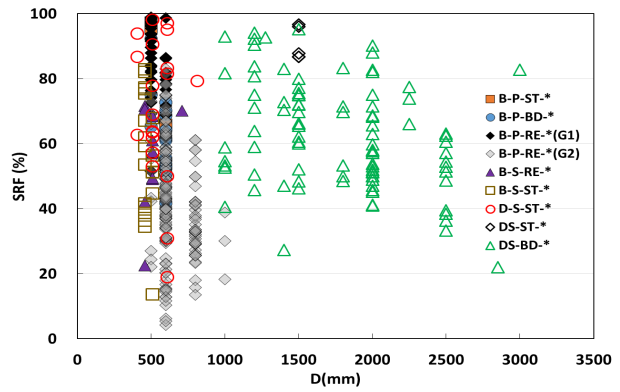
대한 *SRF*를 분석하였다. *SRF*는 말뚝의 제원(직경, 상대근입길이)뿐만 아니라 지반특성치, 말뚝시공법, 재하시험 종류 등에 따라 달라질 것으로 예상하였다. 재하시험의 종류, 시공법의 종류에 따른 분석 시 말뚝 제원으로 분석할 수 있는 직경 및 상대근입길이에 따른 영향을 살펴보았다. 따라서 말뚝의 종류, 시공법, 재하시험의 종류 등을 구분하지 않고 모든 대상 말뚝에 대하여 말뚝의 직경별, 상대근입길이별로 *SRF*를 나타내었다.

## 2.2 매입 PHC말뚝

Fig. 2에는 매입 PHC말뚝의 *SRF*를 나타내었으며 다음과 같이 분석할 수 있었다. 순수 시험용 말뚝에 대한 압축정재하시험에서는 66~97%의 범위에 분포하였으며 사용 시험말뚝인 양방향 재하시험에서는 42~95%의 범위에 분포하였다. 재항타 동재하시험의 경우 순수 시험용 말뚝에 대한 G1그룹에서는 하한계 측으로 분산

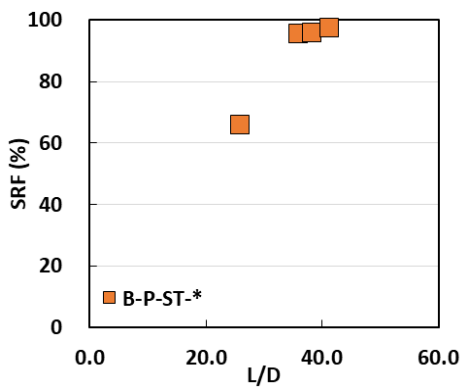


(a) Analysis According to Relative Penetration Lengths

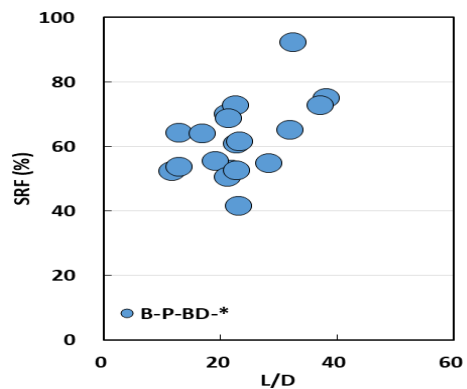


(b) Analysis According to Pile Diameters

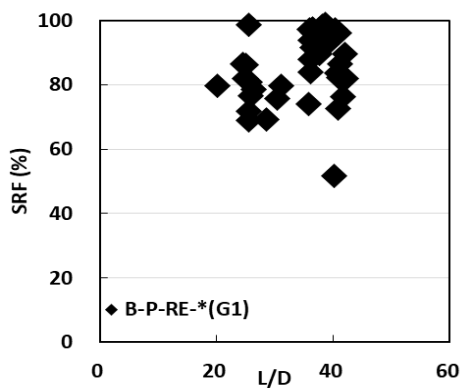
Fig. 1. *SRF* Analysis for All Case Piles



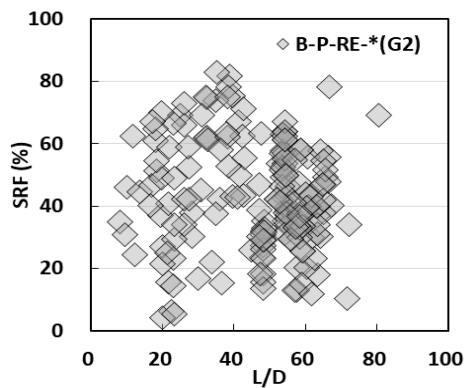
(a) Static Compressive Pile Load Tests



(b) Bi-directional Pile Load Tests



(c) PDA(Restrike)(B-P-RE-\*(G1))



(d) PDA(Restrike)(B-P-RE-\*(G2))

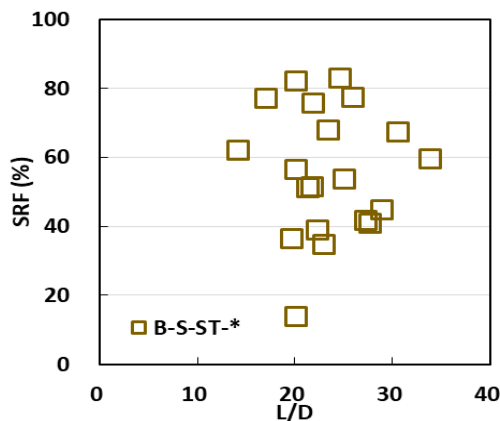
Fig. 2. *SRF* Analysis According to Pile Load Test Types on Prebored PHC Pile

이 크게 나타난 1개 자료는 제외하면 69~99%의 범위에 분포하였으며 사용 시험말뚝인 G2그룹에서는 4~83% 범위에서 크게 분산되어 분포하였다.

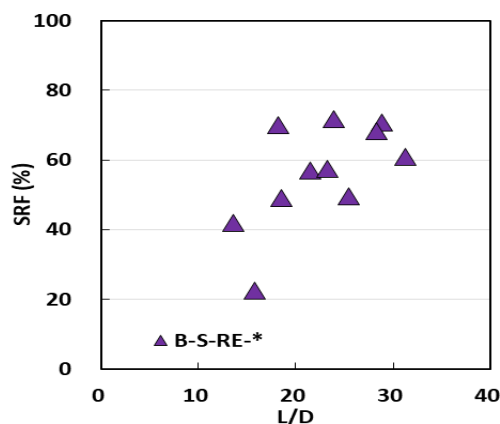
압축정재하시험에서는 말뚝 두부가 파괴될 만큼의 높은 재하하중을 작용시켰으므로 주변마찰력이 극한 하중 단계 수준에 도달하였다. 양방향 재하시험에서는 설정된 재하용량에서 최대하중 작용 시 기준변위에서 측정되었으므로 주변마찰력이 충분하게 발휘되지 못하였다. G1그룹의 매입 PHC말뚝은 주변고정액이 제대로 충전되어 주변고정액의 시공 품질이 양호하였다. 그러나 시험사용말뚝인 G2그룹의 매입 PHC말뚝은 말뚝 시공자에 의해 주변고정액의 충전 시공관리가 전적으로 이루어졌으므로 주변고정액의 충전 상태 및 시공 품질관리 상황 등은 제대로 파악할 수가 없었다.

### 2.3 매입 강관말뚝

Fig. 3에는 순수 시험용 말뚝인 매입 강관말뚝의 SRF



(a) Static Compressive Pile Load Tests



(b) PDA(Restrike)

Fig. 3. SRF Analysis According to Pile Load Test Types on Prebored Steel Pile

가 나타나 있으며 다음과 같이 분석할 수 있었다. 순수 시험용 말뚝 20개에 대한 압축정재하시험에서는 35~83%의 범위에 분포하였으며 반력말뚝 11개에 대한 재향타 동재하시험에서는 42~72%의 범위에 분포하였다. 각각에서 하한계 측으로 분산이 크게 나타난 1개 자료는 제외하였다. 이들에 대한 SRF는 유사한 수준으로 나타났다.

주변고정액의 시공 품질관리는 해당 연구자가 담당하였다. 말뚝 시공 직후 주변고정액을 1차로 1차례 충분히 충전하였다. 2~3일 후 압축정재하시험을 위한 반력앵커 시공 단계에서 시험말뚝 주변부의 충전 상태를 육안으로 관찰한 결과 주변고정액의 지중 유출이 의심되어 2차로 충전을 1차례 추가로 실시하였다. 순수 시험용 말뚝도 주변고정액의 충전이 충분하지 않으면 주변고정액의 시공 품질이 저하될 수밖에 없음을 알 수 있다. 따라서 매입 말뚝 시공에서는 주변고정액의 시공 품질관리가 가장 중요한 요소 중의 하나이며 이와 관련한 연구 및 시공 기술 개발의 필요성이 제기된다. 향후 이와 관련한 연구가 이루어져 제도적인 개선 방안이 제시되어야 할 것으로 생각된다.

### 2.4 직향타 강관말뚝

Fig. 4에는 시험사용말뚝인 직향타 강관말뚝의 SRF가 나타나 있으며 다음과 같이 분석할 수 있었다. 시험사용말뚝에 대한 압축정재하시험에서는 하한계 측으로 분산이 크게 나타난 2개 자료는 제외하면 50~98%의 범위에 분포하였다. 압축정재하시험에서는 지반의 파괴가 유발될 정도의 높은 재하하중을 작용시켰으므로 주변마찰력이 극한 하중 단계 수준에 도달하였다.

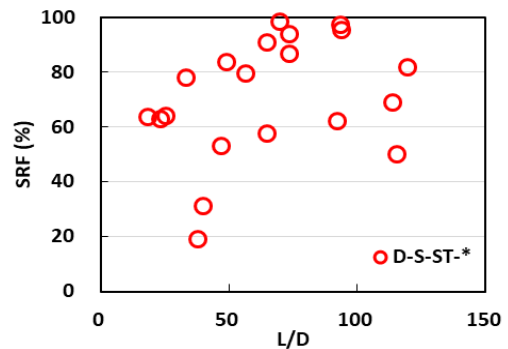


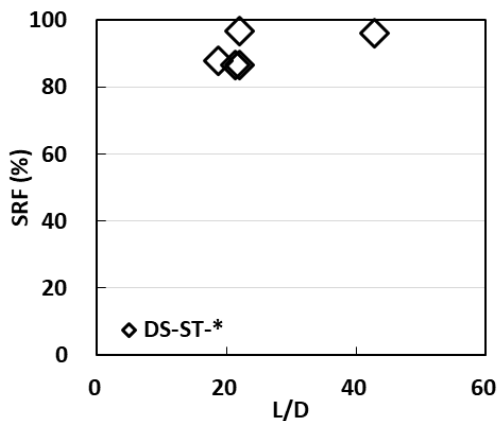
Fig. 4. SRF Analysis on Driving Steel Pile

## 2.5 대구경 현장타설말뚝

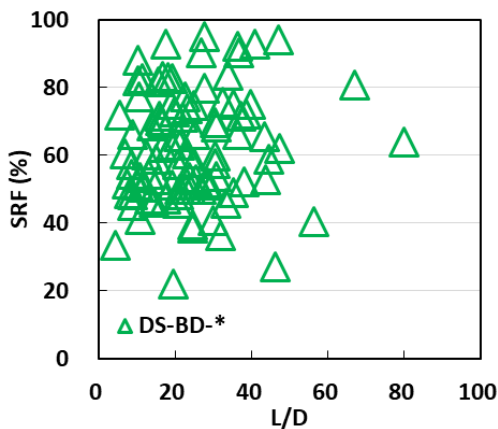
Fig. 5에는 시험사용말뚝인 대구경 현장타설말뚝의 *SRF*가 나타나 있으며 다음과 같이 분석할 수 있었다. 압축정재하시험에서는 87~97%의 범위에 있었으며 양방향 재하시험에서는 하한계 측으로 분산이 크게 나타난 2개 자료는 제외하면 36~95%의 범위에 분포하였다. 압축정재하시험에서는 최대 재하하중에서 주변마찰력의 일부만 발휘되었다. 양방향 재하시험에서는 설정된 재하용량에서 최대하중 직용 시 기준변위에서 측정되었으므로 마찰력이 충분하게 발휘되지 못하였다.

## 2.6 분석 내용의 정리

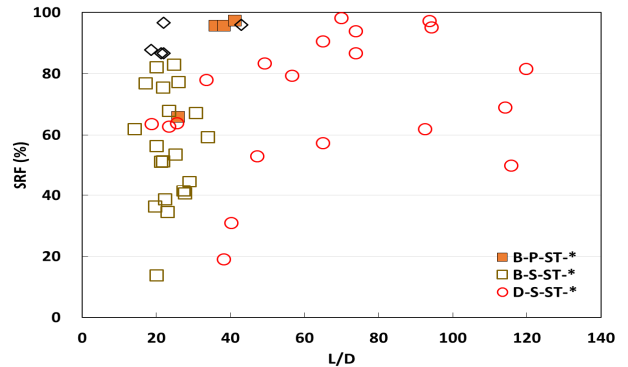
Fig. 6 및 Fig. 7에는 재하시험의 종류에 따른 *SRF*를 나타내었으며 다음과 같이 분석할 수 있었다. 순수 시험용 말뚝의 *SRF*는 약 35~99%의 범위에 분포하였으며



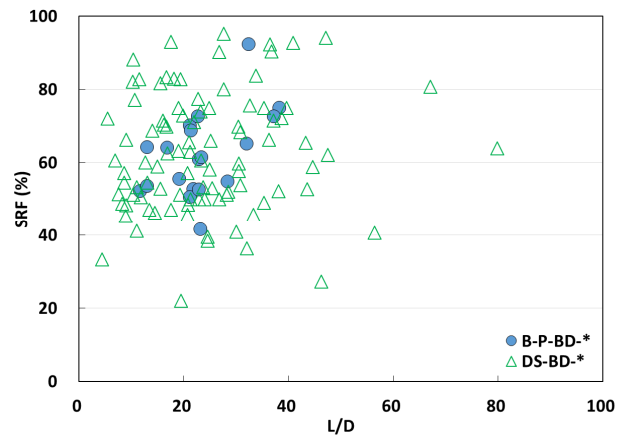
(a) Static Compressive Pile Load Tests



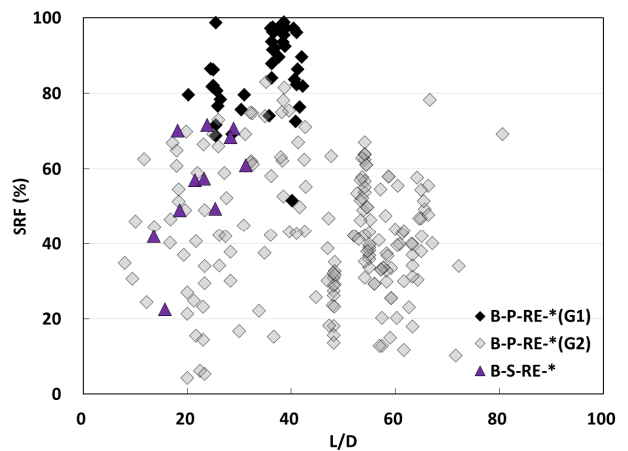
(b) Bi-directional Pile Load Tests



(a) Static Compressive Pile Load Tests



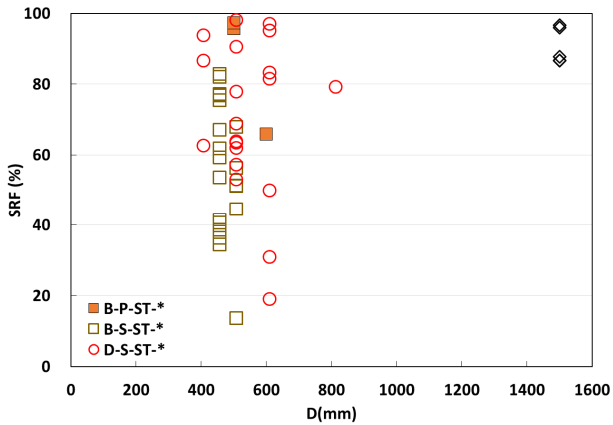
(b) Bi-directional Pile Load Tests



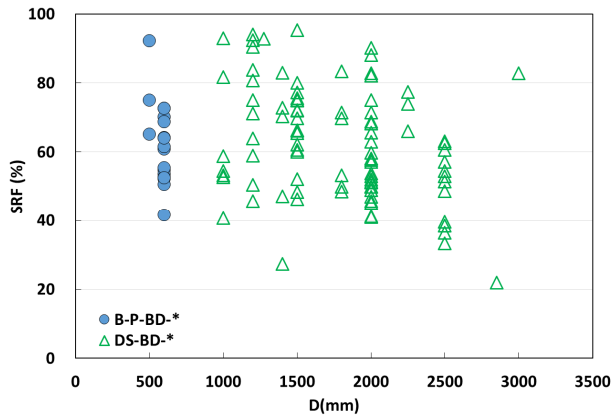
(c) PDA Tests

Fig. 5. *SRF* Analysis According to Pile Load Test Types on Large Diameter Drilled Shafts

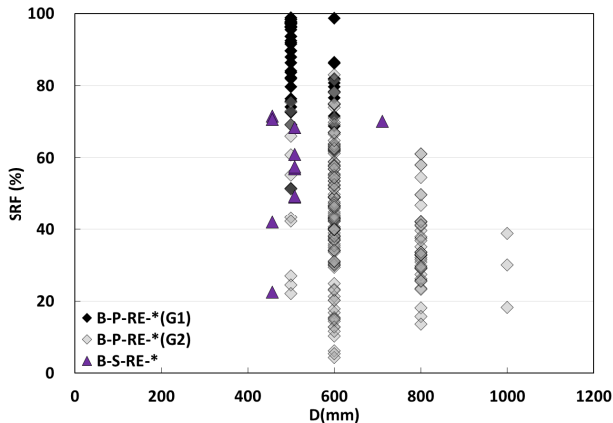
Fig. 6. *SRF* Analysis According to Pile Load Test Types, Relative Pile Penetration Lengths and Pile Types



(a) Static Compressive Pile Load Tests



(b) Bi-directional Pile Load Tests



(c) PDA Tests

Fig. 7. *SRF* Analysis According to Pile Load Test Types, Pile Diameters and Pile Types

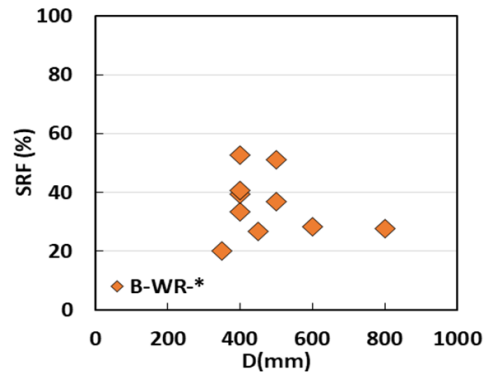
### 3. 매입 PHC말뚝의 *SRF* 분석

#### 3.1 설계 사례 분석을 통한 *SRF* 분석

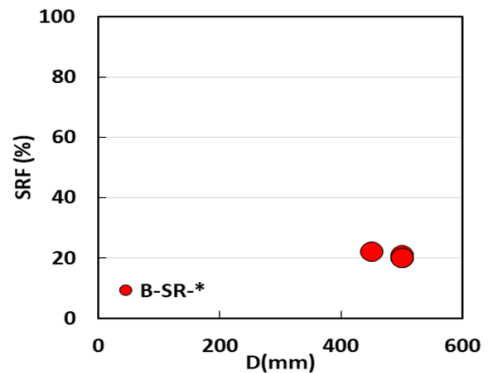
##### (1) 설계 자료 개요

Table 2에는 분석에 사용한 매입 PHC말뚝에 대한 설계 자료들의 개요를 나타내었다. 시공법의 종류, 말뚝

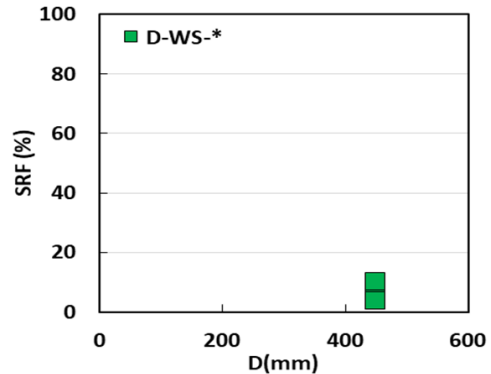
선단부가 소켓된 지반의 종류, 직경, 근입깊이, 소켓 길이, 설계하중, PHC말뚝의 장기허용압축하중, 용접이음과 장경비에 의한 감소율을 고려한 PHC말뚝의 허용지지력, 지반의 허용지지력, 허용주면마찰력, 허용선단지지력, PHC말뚝의 허용지지력 등을 나타내었다. 또한 풍화도에 소켓된 직항타 PHC말뚝의 자료도 수집되었으므로 그 내용도 Table 2에 함께 나타내었다. 설계 시 PHC말뚝 본체의 직경만으로 계산한 외주면적으로 주면저항력을 계산하며 주면고정액의 두께는 전혀 고려하지 않는다. 일반적으로 설계서에는 굴착공경의 크기



(a) Pre-bored PHC Piles Socketed into Weathered Rock



(b) Pre-bored PHC Piles Socketed into Soft and/or Hard Rock



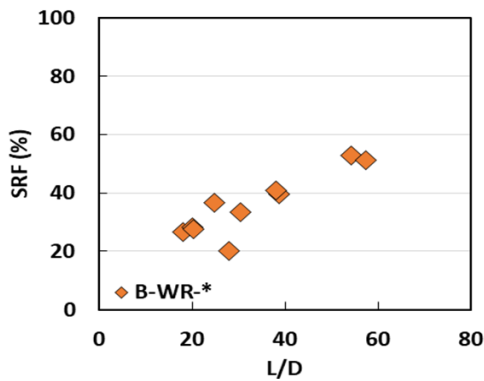
(c) Driving PHC Piles Socketed into Weathered Rock

Fig. 8. *SRF* Analysis According to Pile Diameters Based on Current Design Data

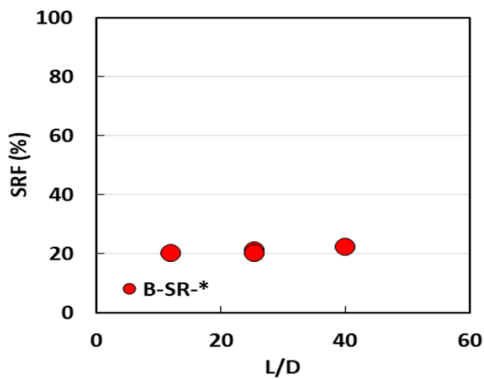


도 나타내지 않는다. 시공 시방서에는 굴착케이싱의 외부직경은 PHC말뚝의 외경보다 통상적으로 10mm 이상으로 정하도록 기술되어 있지만 현장 시공 시 그보다 작은 직경의 케이싱도 흔하게 사용한다. 또한 풍화암과 풍화토를 구분하는 기준은 여러 기관, 문헌 등에서 정하고 있다. 그러나 이 논문에서는 설계서에 나타나 있는 지층구분을 그대로 인용하였다.

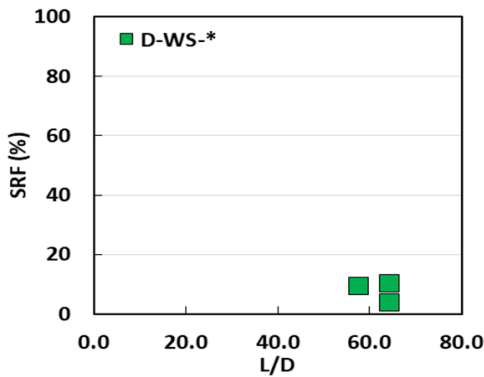
Table 2에서 설계 자료의 사례 말뚝들에 대한 SRF를 분석하였다. 시공법, PHC말뚝의 선단부가 소켓된 지반의 종류에 따라 모든 대상 사례 말뚝에 대하여 말뚝의



(a) Pre-bored PHC Piles Socketed into Weathered Rock



(b) Pre-bored PHC Piles Socketed into Soft and/or Hard Rock



(c) Driving PHC Piles Socketed into Weathered Rock

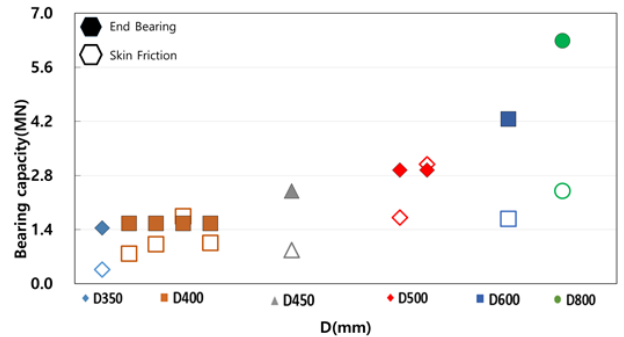
Fig. 9. SRF Analysis According to Relative Pile Lengths Based on Current Design Data

직경별, 상대근입길이별로 SRF를 분석하여 각각 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다.

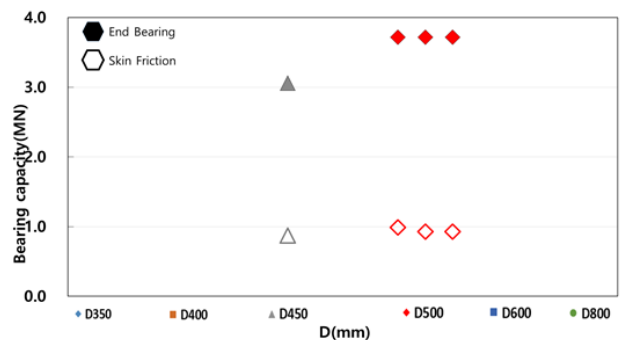
(2) SRF 분석

매입 PHC말뚝에 대한 설계 자료에서 구한 SRF를 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. SRF는 풍화암에 소켓된 경우 20~53%의 범위에 분포하였으며 연·경암에 소켓된 경우 약 21%이었다. 또한 풍화토에 소켓된 직항타 PHC말뚝의 경우 SRF는 약 8%이었다.

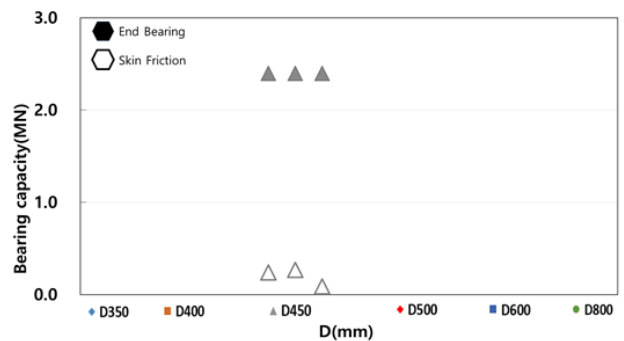
Fig. 10에는 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝 10개(B-WR-1~10)에 대한 설계에서 사용한 극한지지력 산정 공식으로 계산한 극한주면마찰력과 극한선단지지력을 나타내었다. 각 그림에서 기호의 속이 채워진 것은 선단



(a) Pre-bored PHC Piles Socketed into Weathered Rock



(b) Pre-bored PHC Piles Socketed into Soft Rock



(c) Driving PHC Piles Socketed into Weathered Rock

Fig. 10. Comparison of Calculated Ultimate Skin Friction and Calculated End Bearing Using Current Design Method

Table 2. Design Cases for Prebored PHC Piles and Driving PHC Piles

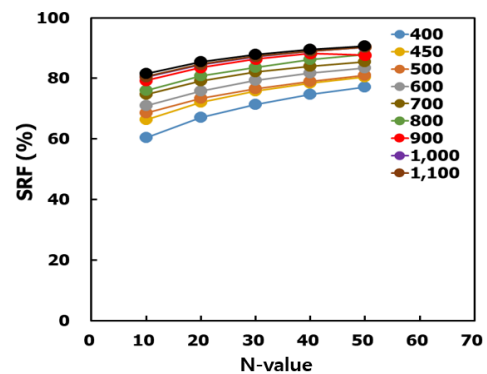
Cases	Pile Information					Design Information (MN)					
	$D$ (m)	$L$ (m)	$\frac{L}{D}$	$L_b$ (m)	$P_a$ (MN)	$P_D$	$Q_a$	$P_{all}$	Allowable Bearing Capacity		
									$Q_{all}$	$Q_{all,s}$	$Q_{all,b}$
B-WR-1	0.35	9.8	28.0	1.0	-	0.40	0.60	-	0.60	0.12	0.48
B-WR-2	0.40	12.2	30.5	4.0	1.12	0.70	0.75	1.12	0.78	0.26	0.52
B-WR-3	0.40	15.5	38.8	1.0	1.12	0.70	0.86	1.09	0.86	0.34	0.52
B-WR-4	0.40	21.7	54.3	1.0	1.12	0.70	1.09	1.09	1.10	0.58	0.52
B-WR-5	0.40	15.2	38.0	1.0	1.12	0.70	0.86	1.09	0.86	0.35	0.52
B-WR-6	0.45	8.1	18.0	1.0	1.34	1.34	1.09	1.34	1.09	0.29	0.80
B-WR-7	0.50	12.4	24.8	4.5	1.73	1.50	1.55	1.73	1.55	0.57	0.98
B-WR-8	0.50	28.7	57.4	6.6	1.73	1.50	1.69	1.69	2.01	1.03	0.98
B-WR-9	0.60	12.0	20.0	1.6	2.31	1.90	1.98	2.31	1.98	0.56	1.42
B-WR-10	0.80	16.2	20.3	1.5	3.91	2.60	2.90	3.72	2.90	0.80	2.10
B-SR-1	0.45	18.0	40.0	1.0	1.37	1.25	1.30	1.30	1.31	0.29	1.02
B-SR-2	0.50	12.7	25.4	2.0	1.73	1.50	1.57	1.73	1.57	0.33	1.24
B-SR-3	0.50	6.0	12.0	3.7	1.73	1.50	1.55	1.73	1.55	0.31	1.24
B-SR-4	0.50	12.7	25.4	2.0	1.73	1.50	1.55	1.73	1.55	0.31	1.24
D-WS-1	0.45	26.0	57.8	2.5	1.37	0.80	0.88	1.30	0.88	0.08	0.80
D-WS-2	0.45	29.0	64.4	3.5	1.37	0.80	0.89	1.30	0.89	0.09	0.80
D-WS-3	0.45	29.0	64.4	1.1	1.37	0.80	0.83	1.30	0.83	0.03	0.80

Remarks  $L_b$  (Socket Lengths),  $P_D$  (Design Load of PHC Piles),  $P_a$  (Long-term Allowable Axial Pile Load of PHC Piles),  $Q_a$  (Allowable Axial Pile Load of PHC Piles),  $P_{all}$  (Allowable Axial Pile Load of PHC Piles Considering Reduction Rate),  $Q_{all}$  (Allowable Bearing Capacity of Soil and/or Rock),  $Q_{all,s}$  (Allowable Skin Friction of Soil and/or Rock),  $Q_{all,b}$  (Allowable End Bearing Capacity of Soil and/or Rock),  $B$  (Prebored Piling Method),  $WR$  (Weathered Rock),  $SR$  (Soft Rock),  $D$  (Driving Piling Method),  $WS$  (Weathered Soil)

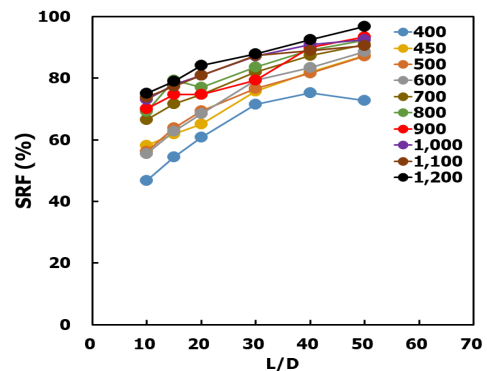
지지력이고 기호의 속이 비워진 것은 주변마찰력이다. 동일 직경의 경우 극한선단지지력은 상대근입길이 및 지반의 N치에 상관없이 일정한 값으로 계산할 수 있다. 그러나 동일 직경의 경우 극한 주변마찰력은 직경에 따라 큰 차이를 보이며 상대근입길이 및 지반의 N치에 따라 달라졌다. 또한 극한 선단지지력은 극한주변마찰력에 비해 비교적 큰 값으로 계산할 수 있으며 따라서  $SRF$ 는 매우 낮은 수준으로 나타났다. 이것은 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식에서는 주변마찰력이  $2N_s$  또는  $c_u$ 로 계산되고 선단지지력이  $200N_b$ (또는  $250N_b$ )로 계산되고 있으므로 나타날 수밖에 없는 현상이다. 여기서  $N_s$ 는 말뚝 주변부 지반의 보정 N치,  $c_u$ 는 말뚝주변부 지반의 비배수 점착력,  $N_b$ 는 말뚝 선단소켓지반의 N치이다. 따라서 이러한 모순을 내포하고 있는 현 단계의 지지력 산정공식으로 계산하여 나온 하한값으로 설계한다는 것은 지양해야 할 것이며 새로운 지지력 산정공식을 시급하게 개발하여야 하는 이유가 될 수도 있다.

### 3.2 수치해석 자료를 통한 $SRF$ 분석

사질토를 지나 풍화암에 4D소켓된 매입 PHC말뚝의



(a) Analysis by N values in case of  $L/D=30$



(b) Analysis by  $L/D$  in case of  $N=30$

Fig. 11.  $SRF$  Analysis According to Pile Diameters, Relative Pile Lengths, SPT N Values of Sandy Soil Layer (Choi et al., 2019)

수치해석 자료(Choi et al., 2019)로부터 구한 *SRF*를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11은  $N_s=30$ ,  $L/D=30$ 에 대한 사례이다. 여기서 수치해석과 관련한 상세한 내용은 연속논문 제5편으로 게재할 예정이다. Fig. 11(a)에는 PHC말뚝의 직경별 사질토의  $N$ 치에 따른 *SRF*를 나타내었다. 파괴하중 단계에서 *SRF*는 사질토 지반의  $N$ 치에 상관없이 60~90%로 나타났다. Fig. 11(b)에는 PHC말뚝의 직경별 상대근입길이에 따른 *SRF*를 나타내었다. 파괴하중 단계에서 *SRF*는 상대근입길이에 상관없이 56~91%이었다.

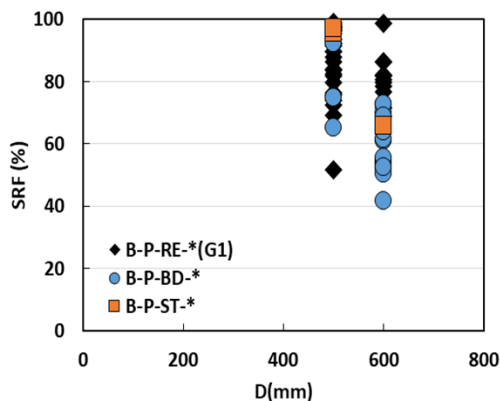
### 3.3 재하시험 자료를 통한 *SRF* 분석

실제 시공된 매입 PHC말뚝에 대한 재하시험 자료로부터 구한 *SRF*를 분석하였다. Fig. 2에서 직경에 따른 *SRF*를 정리하여 Fig. 12에 나타내었으며 상대근입길이에 따른 *SRF*를 정리하여 Fig. 13에 나타내었다.

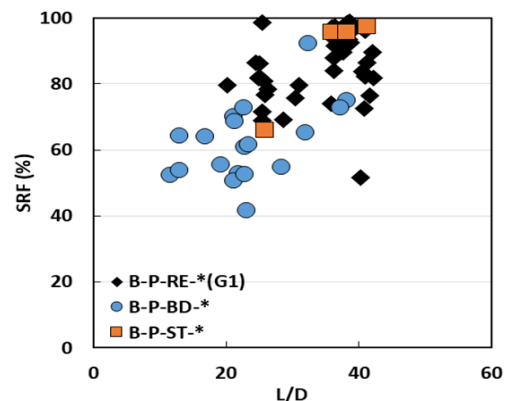
Fig. 12(a) 및 Fig. 13(a)에서는 실제 현장에서 순수 시험용 말뚝으로 시공된 매입 PHC말뚝의 재하시험 자료

로부터 매입 PHC말뚝의 *SRF*는 42~99%의 범위에 분포하였다. Fig. 12(b) 및 Fig. 13(b)에서는 시험사용말뚝으로 실제 시공된 매입 PHC말뚝의 재항타 동재하시험(G2그룹) 자료로부터 매입 PHC말뚝의 *SRF*는 4~83%의 범위에 분산되어 나타났다. G2그룹의 재항타 동재하시험은 시공 현장에서 시공 또는 감리 관계자가 지정한 매입 PHC말뚝에서 실시되었다.

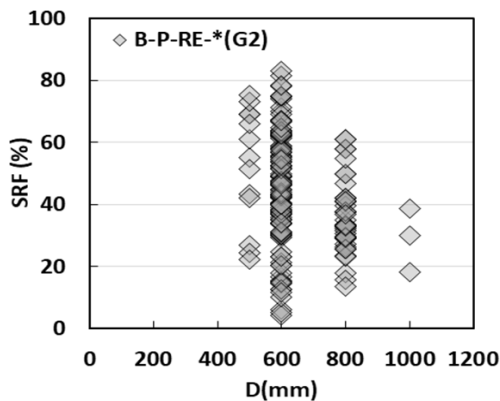
순수 시험용 말뚝에서 실측된 시험 자료에서는 변동성이 크지 않다. 이들 자료는 이 논문의 연구진 또는 자료 제공자들이 직접 취득한 자료이며 해당 연구진들이 순수 시험용 말뚝에 대한 주면고정액의 충전 상태는 제대로 파악하였으므로 자료의 신뢰성을 의심하기는 어렵다. 그러나 시험사용말뚝에서 실측된 시험 자료에서는 변동성이 크게 나타났다. 이들 자료는 매입 PHC말뚝의 시공 현장에서 말뚝 시공자들에 의해 시공된 말뚝에서 실시된 동재하시험 자료이며 동재하시험을 수행한 회사에서 제공한 자료이다. 따라서 주면고정액의 시공 품질 관리 상황 또는 동재하시험 품질 등에 관하여 구체적인 정보를 확인할 수 있는 방법이 없었다. 따라서 연



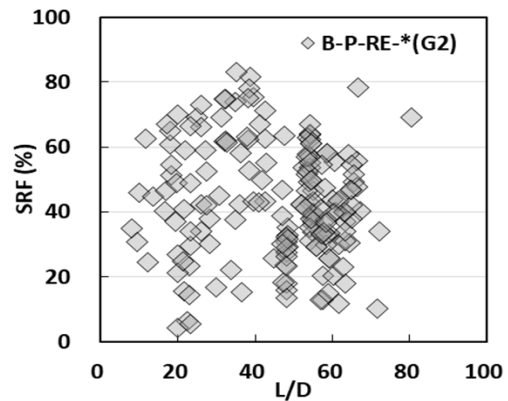
(a) Actual Construction Data



(a) Actual Construction Data



(b) PDA(Restrike) Data for B-P-RE-\*(G2)



(b) PDA(Restrike) for B-P-RE-\*(G2)

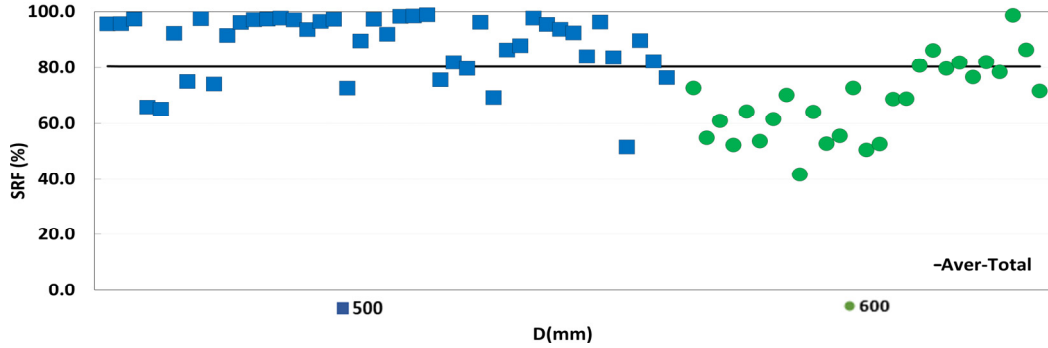
Fig. 12. *SRF* Analysis According to Pile Diameters of Pre-bored PHC Piles Socketed into Weathered Rock

Fig. 13. *SRF* Analysis According to Relative Pile Lengths of Pre-bored PHC Piles Socketed into Weathered Rock

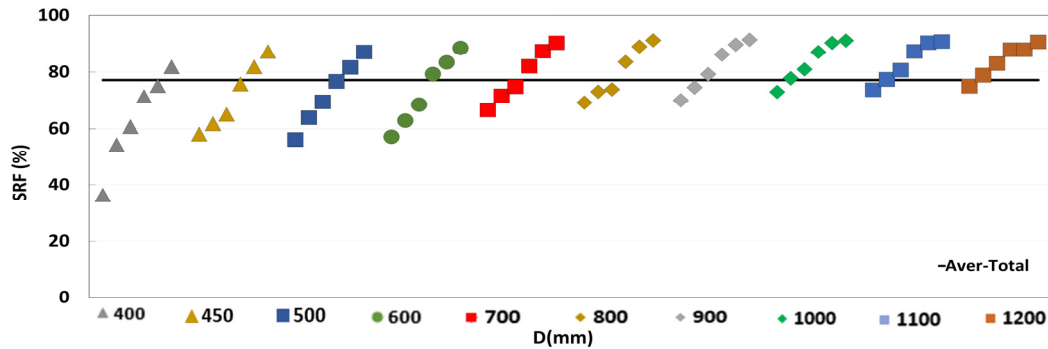
구진 자체의 검증을 할 수 없는 한계가 있었으나 제공된 자료를 그대로 분석할 수밖에 없었다. 따라서 시험사용 말뚝에 대한 주변고정액의 충전 상태를 정량적으로 제대로 파악할 수 없었다.

### 3.4 분석 내용의 정리

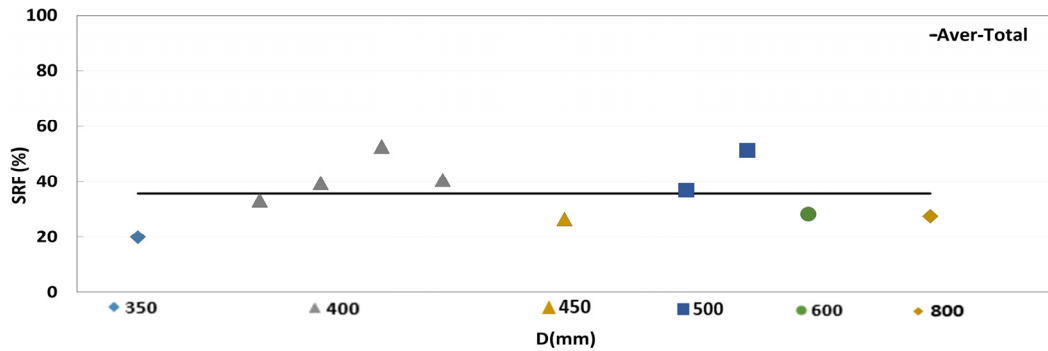
Fig. 14에서 다음을 분석할 수 있었다. (a)에는 순수 시험용 말뚝으로 현장에서 실제 시공된 매입 PHC말뚝



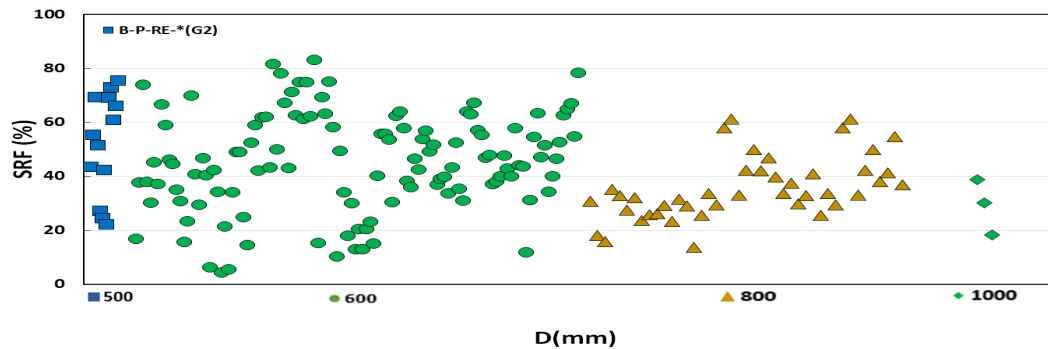
(a) Pile load test data of test prebored PHC piles (Replot of Fig. 2(a)~(c))



(b) Numerical analysis data (Choi et al., 2019) (Replot of Fig. 11(b))



(c) Pile design data (Replot of Fig. 8(c))



(d) Restrike PDA data of working prebored PHC piles (Replot of Fig. 2(d))

Fig. 14. *SRF* According to Pile Diameter on Pre-bored PHC Piles

에 대한 압축정재하시험, 양방향재하시험, 재항타동재하시험(G1) 자료를 도시하였으며  $SRF$ 는 42~99%이었다. (b)에는 수치해석 자료를 나타내었고  $SRF$ 는 56~91%이었다. (c)에는 설계 자료를 나타내었으며  $SRF$ 는 20~53% 정도로 나타났다. (d)에는 시험사용말뚝으로 실제 시공된 매입 PHC말뚝의 재항타 동재하시험(G2) 자료를 나타내었으며  $SRF$ 는 4~83% 정도였다.

따라서 매입 PHC말뚝의 설계에서 사용하고 있는 지지력 산정공식은 실제 시공된 매입 PHC말뚝의 지지력 거동을 제대로 평가할 수 없는 것으로 나타났다. 또한 시험사용말뚝인 매입 PHC말뚝의 재항타동재하시험에 의한  $SRF$ 도 매우 낮은 수준을 나타내었다.

#### 4. 결론 및 제언

실제 시공된 말뚝기초 및 매입 PHC말뚝의 현행 설계 자료로부터  $SRF$ 를 분석하였다. 이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 순수 시험용 말뚝으로 실제 시공된 매입 PHC말뚝의  $SRF$ 는 42~99%이었으며 재하시험의 종류에 따른 차이는 크지 않았다. 다만 재하시험의 종류에 따라 다음과 같이 분석할 수 있었다.  $SRF$ 는 압축정재하시험에서는 66~97%이었으며 양방향 재하시험에서는 69~99%이었고 재항타 동재하시험에서는 G1 그룹의 경우 42~95%이었다.
- (2) 시험사용말뚝으로 실제 시공된 매입 PHC말뚝의 재항타 동재하시험(G2) 자료로부터 매입 PHC말뚝의  $SRF$ 는 4~83%의 범위에 크게 분산되어 분포하였다. 여기서 G2그룹의 재항타 동재하시험은 시공 현장에서 시공 또는 감리관계자가 지정한 매입 PHC말뚝에서 실시되었다. 이들 자료는 매입 PHC말뚝의 시공 현장에서 말뚝 시공자들에 의해 시공된 말뚝에서 실시된 동재하시험 자료이며 동재하시험을 수행한 회사에서 제공한 자료이다. 따라서 주면고정액의 시공 품질 관리 상황 또는 동재하시험 품질 등에 관하여 구체적인 정보를 확인할 수 있는 방법이 없었다. 따라서 연구진 자체의 검증할 수 없는 한계가 있었으나 제공된 자료를 그대로 분석할 수밖에 없었다. 따라서 시험사용말뚝에 대한 주면고정액의 충전 상태를 정량적으로 제대로 파악할 수 없었다.

- (3) 매입 PHC말뚝에 대한 설계 자료에서 구한  $SRF$ 는 풍화암에 소켓된 경우 20~53%의 범위에 있었고 연·경암에 소켓된 경우 약 21%이었다. 또한 풍화토에 소켓된 직항타 PHC말뚝의 경우  $SRF$ 는 약 8%이었다.
- (4) 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식으로 계산한  $SRF$ 가 실제 말뚝의  $SRF$ 보다 2.2배 정도로 낮은 수준으로 평가되었다. 이는 설계에서 사용하고 있는 극한주면마찰력 산정공식이 매우 낮은 수준으로 계산되기 때문이다. 따라서 실제 매입 PHC말뚝의  $SRF$ 를 만족시킬 수 있는 주면마찰력 산정공식뿐만 아니라 선단지지력 산정공식을 새롭게 제안해야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌 (References)

1. Choi, Y. K. (1997), Report on Pile load test for design purpose during working design stage of the 2<sup>nd</sup> Busan grand bridge construction project, Research Institute of Engineering & Technology, Kyungshung University, pp.1-143. (In Korean)
2. Choi, Y. K. (2000), Review report on stability of drilled shafts of Gwangan grand bridge construction project through static pile load tests and numerical analyses, Research Institute of Engineering & Technology, Kyungshung University, pp.1-455. (In Korean)
3. Choi, Y. K. (2001), Report on design change of pile foundations during Centum city approach road (Suyeong 3<sup>rd</sup> bridge) construction project, Research Institute of Engineering & Technology, Kyungshung University, pp.1-205. (In Korean)
4. Choi, Y. K., Kwon, O. K., Lee, W. J., Yeo, K. K., and Jeon, B. H. (2017), A Study on Behavior of PHC Piles with Various End Bearing Methods, KGS Report No. KGS2017-281, 2017. 10., pp. 1-161. (In Korean)
5. Choi, Y. K., Kwon, O. K., Lee, W. J., and Yeo, K. K., and Park, M. C. (2019), A Study for Establishing of Behavior, Design and Construction on Prebored and Precast Piles (Development of Capacity Prediction Method and Chart for Prebored and precast Piles Considering Soil Types, Pile Penetration Lengths, Pile Diameter), Report No. KGS 2019-083, pp.21-45, 273-300. (In Korean)
6. G-TEC (2017), Final Report of Static Pile Load Test with Load Distribution Analysis for Estimating Resistance Factor on Representative Prebored and Precast Piling Method, 2017. 10., pp.1-86. (In Korean)
7. KGS (2016), Static Pile Load Test Report at OO Field for Estimating Resistance Factor on Representative Prebored and Precast Piling Method, 2016. 11. pp.1-12 (In Korean).
8. KGS (2017a), Static Pile Load Test Report at OO Field for Estimating Resistance Factor on Representative Prebored and Precast Piling Method, 2017. 10. pp.1-43. (In Korean)
9. KGS (2017b), Static Pile Load Test Report at OO Field for Estimating Resistance Factor on Representative Prebored and Precast Piling Method, 2017. 10. pp.1-23. (In Korean)

10. Kim, B. I., Lee, S. H., Kim, Y. U., Jo, S. M., Yoon, C. Y., and Jo, Y. J. (2013), Foundation Engineering, MoonUnDang, ISBN 978-89-7393-985-5, p.167. (In Korean)

11. SGS (2017), Static Pile Load Test Report at OO Field for Estimating Resistance Factor on Prebored and PHC Piling Method, 2017. 11., pp.1-70. (In Korean)

12. Tomlinson, M. J. (1994), Pile design and construction practice 4<sup>th</sup> edition, E & FN Spon., pp.133-134. (In Korean)

Received : June 4<sup>th</sup>, 2019

Revised : August 17<sup>th</sup>, 2019

Accepted : August 19<sup>th</sup>, 2019