

SIP 말뚝의 주면저항력 특성 고찰 및 산정식 제안

Investigation of Characteristics and Suggestion of Evaluation Formulae for Skin Resistance of SIP

임해식* · 박용부** · 박종배***
Lim, Hae-Sig · Park, Yong-Boo · Park Jong-Bae

Abstract

Because of the environmental problem during the pile driving, the use of low noise-vibration auger-drilled piling is increasing to solve noise and vibration problem in piling. In Korea, SIP (Soil-Cement Injected Precast Pile) method is mainly used as auger-drilled piling.

But, a proper bearing capacity evaluation formula has not been suggested, yet. To improve and supplement this situation, direct shear tests between SIP pile skin interface and soil were executed under various conditions.

Through the analysis of test results, skin resistance characteristics of SIP were investigated thoroughly. Also, the maximum unit skin resistance capacity evaluation formulae on SM, SC soil was suggested.

Keywords : SIP, Skin resistance, Interface of SIP

요 지

건설공사에서 발생하는 환경문제에 대한 관심이 고조되는 가운데 기성 말뚝을 향타하는 과정에서 유발되는 소음, 진동문제를 해결하기 위해 저소음, 저진동 공법인 매입말뚝공법이 많이 적용되고 있다. 국내에서는 매입말뚝공법으로 SIP공법이 주로 사용되고 있다.

그러나 아직까지 SIP공법에 관한 합리적인 지지력 산정식이 제시되어있지 못한 실정이다. 이에 대해 본 연구에서는 SIP 말뚝의 주면저항력 특성을 고찰하여 이러한 문제점들을 개선, 보완하기 위하여 다양한 조건에서 SIP 말뚝 주면과 지반흙 사이의 경계면에 대하여 직접전단시험을 실시하였다.

그 결과를 토대로 통일분류상 SM, SC 지반에서의 SIP 말뚝 주면저항력 특성을 고찰하고 해당 지반에서 최대주면저항력 산정식을 제시하였다.

주요어 : SIP, 주면저항력, SIP 말뚝 경계면

* 정회원 · 대한주택공사 과장
** 정회원 · 대한주택공사 선임연구원
*** 대한주택공사 선임연구원

1. 서론

소음, 진동 등 건설공해가 사회적으로 큰 문제로 등장하여 기존 건축물 주변에서의 말뚝공사는 시공이 거의 불가능할 정도로 공사 여건이 악화되고 있으며 이런 상황은 앞으로 계속될 것으로 전망된다. 이를 해결하기 위해, 국내에서는 직항타공법보다는 지반천공 후 기성말뚝을 매입하는 공법인 SIP(Soil-cement Injected Precast Pile) 공법이 전체 말뚝공사 물량의 30%이상을 넘어서고 있으며 향후 점차 증가할 것으로 예상되고 있다(주택공사, 2001).

SIP 공법의 특성상 지지력 발휘는 일반 직항타 말뚝과는 다른 특성을 나타낸다. 특히, SIP 공법에서는 말뚝 주변부

의 조건이 직항타 말뚝과 큰 차이를 보인다. 그러나 아직까지 객관적인 근거를 토대로 한 매입말뚝 고유의 설계 지지력 산정식은 없는 실정이다. SIP 공법 발원지인 일본에서는 주로 표준관입시험 결과인 N값을 이용한 공식을 사용하며 기관별로 기준이 다르다. 국내에서는 이들 산정식을 주로 준용하고있는 실정이며 이들을 표 1에 나타내어 보았다. 특히 SIP 말뚝의 지지력 특성은 시공, 양생, 시멘트 페이스트 배합 등 여러 요인에 의해 영향을 받으므로 많은 시험자료의 분석을 통한 정확한 지지력 산정이 요구된다.

이와 같은 문제 해결에 기여하기 위해 SIP 말뚝 주변과 지반사이의 저항력을 실내 직접전단시험으로 측정하여 경향을 분석하였다.

표 1. 매입말뚝의 설계 지지력 산정식 비교

시공법	선단지지력 산정법	말뚝선단부의 조건	주면 마찰력의 산정식	말뚝주면부의 조건	비고
타격공법	$R_p = 30 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_f = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \Pi$ $\bar{N}_s \leq 50, \quad \bar{q}_u \leq 20 (\bar{q}_u = 1.25N)$	L_s, L_c : 각 사질, 점성지반에의 근입길이 \bar{N}_s : 사질지반의 평균 N Π : 말뚝의 주변장 \bar{q}_u : 점성토의 일축 압축강도	건설성 고시기준
시멘트풀 주입공법	$R_p = 20 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 50$	$R_f = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \Pi$ $\bar{N}_s \leq 25, \quad \bar{q}_u \leq 10 (\bar{q}_u = 1.25N)$		건설성 고시기준
선굴착 근고공법	$R_p = 25 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_f = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \Pi$ $\bar{N}_s \leq 25, \quad \bar{q}_u \leq 10$		건설성 인정공법
선굴착 최종타격공법	$R_p = 30 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_f = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \Pi$ $\bar{N}_s \leq 25, \quad \bar{q}_u \leq 10$		건설성 인정공법
선굴착 최종경타공법	$R_p = 25 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_f = (0.9L_c + 2.4L_s) \Pi$		건설성 인정공법

2. 실내 직접전단시험

SIP 말뚝의 주변저항력 특성을 규명하기 위한 시험방법으로는 여러 가지 방법이 있을수 있으며, 각 방법들마다 각각의 장단점을 가지고 있다. 연구에서는 SIP 말뚝의 주변저항력 특성을 실내 직접전단시험으로 검토해 보기로 하였다.

SIP 말뚝의 표면을 실내 시험시 재현하기 위하여 전형적인 SIP공법으로 시공된 SIP 말뚝을 파내서 그 표면의 본을 떴다. 현장에서 그림 1에서와 같이 식물성 실리콘을 이용하



그림 1. SIP 말뚝 표면 본뜨기

여 표면의 분을 뜯 후 실리콘 요철판을 실험실에서 실리콘 요철면에 직접 시멘트 밀크를 부어 성형할 수가 없으므로 우선 실리콘을 전단상자 면적에 맞게 특수 제작된 형틀 속에 넣어 그 윗면에 우레탄과 반응액을 혼합 후 채워 넣어 우레탄 요철면을 제작하였다. 이렇게 제작된 우레탄 조도판을 다시 형틀 속에 넣어 그 윗면에 SIP 시공 물/시멘트비의 시멘트 밀크를 채워 넣어 시멘트 조도판을 제작하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 각기 조도의 형태가 다른 세 종류의 시멘트 조도판을 제작하였다.

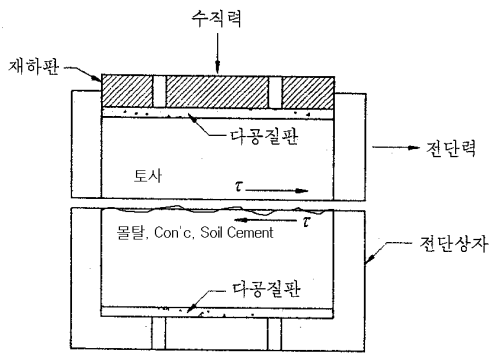


그림 2. 직접전단시험 개요도

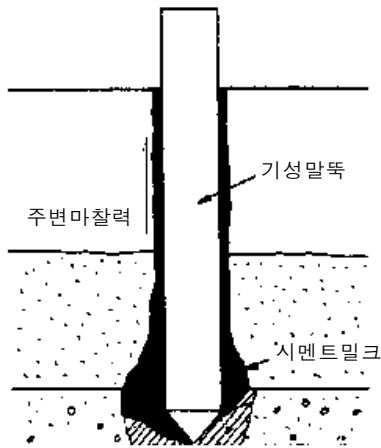


그림 3. SIP 말뚝 주변저항력 개념

2.1 시료토

본 시험에 사용된 흙 시료는 국내에서 광범위하게 분포되어 있는 화강풍화토를 대상으로 하였으며 주요 물성치는 표 2와 같다. 입도 분석을 통한 입도분포곡선은 그림 4과

같다.

표 2. 시료의 물성치

구 분	자연함수비	비중	액성한계	소성한계	토질분류
의정부	16 %	2.70	NP	NP	SM
인천	27 %	2.69	38.13 %	20.06 %	SC

2.2 실내 직접전단시험 개요

직접전단시험의 전단상자 크기는 10cm×10cm를 사용하였고 하부층 상자에는 물/시멘트비 83%의 몰탈로 성형된 조도판과 비조도판, 그리고 현장에서 채취해 온 시료가 채워지고 상부층 상자에는 현장에서 채취해 온 시료를 채워 넣어 3종류의 전단시험을 실시하였다.

총 79회의 시험을 실시하였고, 조도판은 현장에서 오거로 천공하여 시공된 SIP 말뚝의 실제 요철면에 분을 떠 시멘트 밀크로 성형시켜 제작하였고, 비조도판은 요철이 없는 시멘트 몰탈로 성형 제작하였다. 시험은 변형제어 방식으로 전단속도는 $eh = 2\%$ 인 약 2mm/분으로 하였으며 전단시험중 공시체의 최대강도값이 나타나지 않을 때에는 변위 약 10mm 전단상태에서의 값을 최대값으로 채택하였다 (김용필 등, 2000).

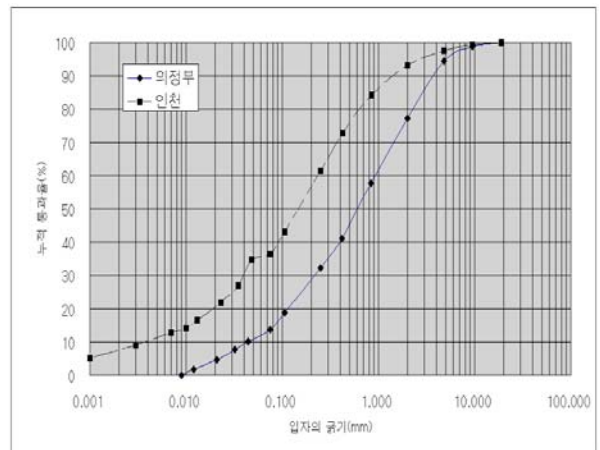


그림 4. 입도분포곡선

표 3. 실내 직접전단시험 개요

구분	내용	비고
시험 종류 및 시험 횟수	· soil-soil (29회) · soil-조도판 (25회) · soil-비조도판 (25회)	· 파괴면의 경계를 3 종류로 대비
함수비	· 16%(의정부 급호 시료) · 27%(인천 도립 시료)	· 현장 자연함수비
수직 응력	· 50kPa, 100kPa, 150kPa 순서를 1set로.	· 시료의 채취심도 고려 (의정부 4m, 인천 5.5m)
습윤 단위중량	· 1.5t/m ³ ~1.9t/m ³	· 단위중량 변화에 따른 강도정수 비교 목적.

3. 실내시험 결과

묘사된 말뚝표면과 접한 흙 사이나 본 실험에 사용된 흙만의 직접전단시험에 의한 일반적인 전단거동은 그림 5와 같다. 이 그림은 매끈한 말뚝 표면과 접한 흙에 대한 직접전단시험 측정 결과를 예시한 것으로 수행된 실내시험에 대해 전반적인 거동 형태는 유사하였다. 동일한 조건에서 전단면에 작용하는 수직하중을 변화시켜 측정된 최대전단응력값을 가지고 경계면에서의 전단저항력을 부착력과 마찰계수로 분리하였다.

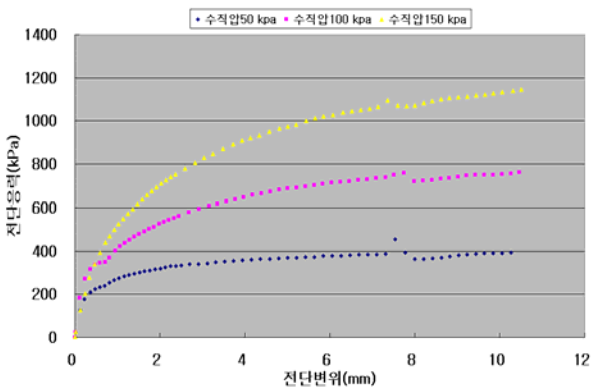


그림 5. 전단변형-응력 관계곡선

그림 6~그림 11은 두 종류 흙시료에 대한 경계면에서 부착력, 마찰각, 주면저항력 값의 흙의 단위무게에 대한 변화를 나타내 본 것이다. 그림의 범례에서 Soil은 전단상자 상·하면에 모두 흙이 채워진 상태인 경우의 시험결과를 말하며, 조도판은 전단상자 한쪽은 거친 SIP 몰탈면을 재

현한 면과 한쪽에는 흙을 채운 경우의 시험 결과값을, 비조도판은 매끈한 말뚝면을 시멘트 몰탈로 재현한 면과 한쪽에는 흙을 채운 경우의 시험 결과값을 의미한다.

주면저항력 값은 깊이 5m 지중의 수평토압을 Jacky의 제안식으로 산정하여 식(1)에 의해 경계면에서의 전단저항력을 산정한 값을 나타낸 것이다. 이때 흙의 단위중량은 각 시험에 사용된 공시체의 단위중량을 사용하였다.

$$\tau = C + \sigma_h \tan \phi \text{ (Coulomb, 1776)} \quad (1)$$

여기서, σ_h : $K_o(\gamma Z)$ (Joseph Bowel, 1982)

K_o : $1 - \sin \phi$ (사질토에서 정지토압계수)

Z : 시료 채취심도 (m)

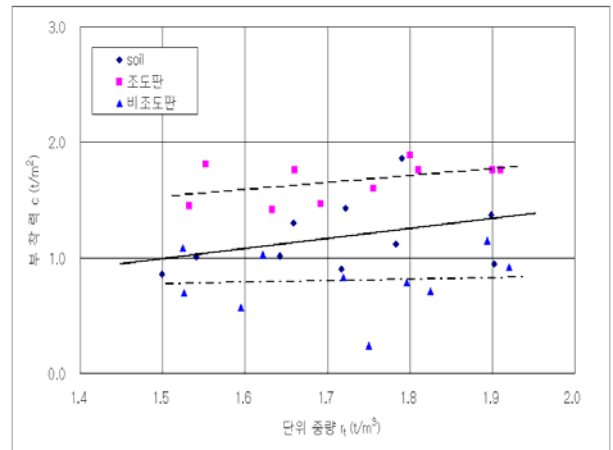


그림 6. 인천시료의 부착력 경향

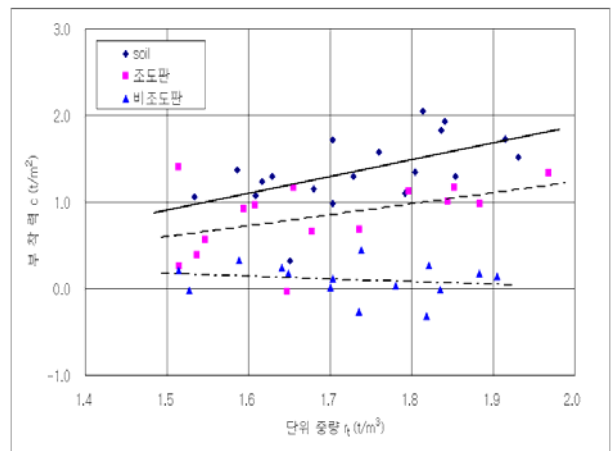


그림 7. 의정부시료의 부착력 경향

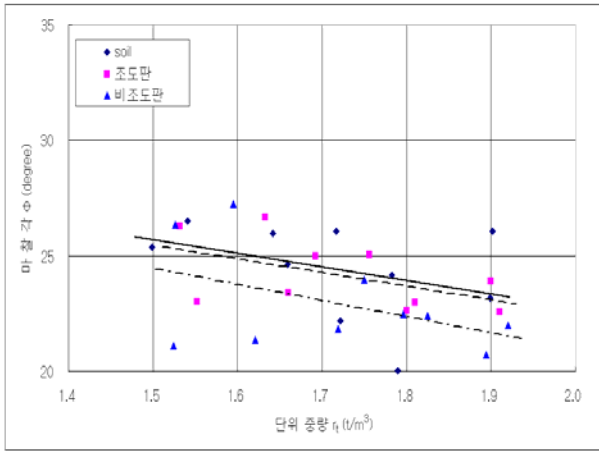


그림 8. 인천시료의 마찰각 경향

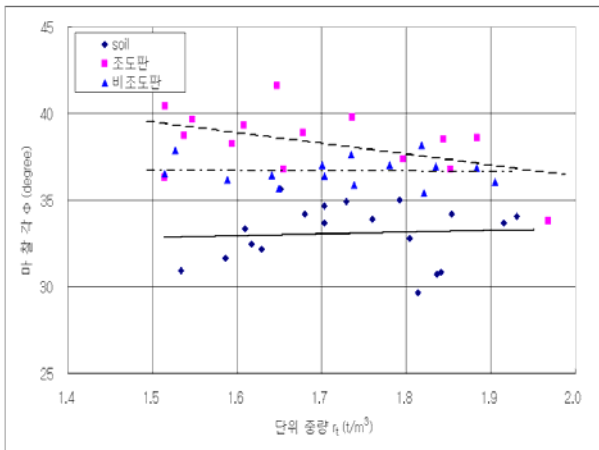


그림 9. 의정부시료의 마찰각 경향

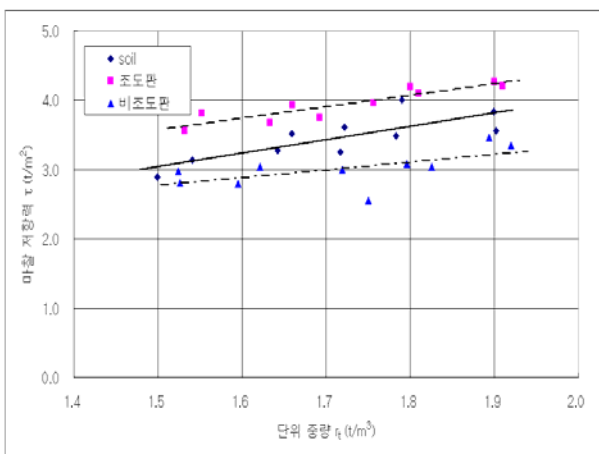


그림 10. 인천시료의 마찰저항력 경향

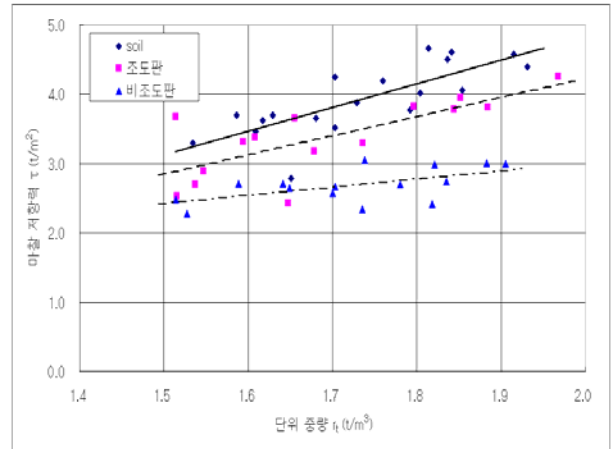


그림 11. 의정부시료의 마찰저항력 경향
3.1 실내시험결과 분석

실내 전단시험 결과를 분석해보면 다음과 같다. 말뚝 주변 경계부에서의 전단저항력을 부착력과 마찰각으로 나타낸 경우를 살펴보면 부착력 성분은 SM 토질(의정부시료)의 경우 흙과 흙, 조도판과 흙, 비조도판과 흙 SC 토질(인천시료)의 경우 조도판과 흙, 흙과 흙, 비조도판과 흙 순으로 크기가 나타났다. 전단이 발생하는 경계부에 접하는 흙의 단위중량이 클수록 부착력 값이 증가한다. 또한, SIP 말뚝과 같이 거친 말뚝 표면에서의 값이 매끈한 말뚝 표면보다 큰 부착력 성분을 가진다는 것을 알 수 있다.

마찰각 성분의 경우는 좀 다른 경향을 나타내는데 SM 토질(의정부시료)의 경우 접면 흙의 단위중량에 따른 변화는 거의 나타나지 않으며 거친면(조도판)의 경우 흙의 단위중량 증가에 따라 오히려 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. SC 토질(인천시료)에서는 모든 표면 상태에서 흙의 단위중량 증가에 따라 마찰각 성분이 감소하는 경향으로 분석되었다. 마찰각 성분의 크기도 토질에 따라 면거칠기에 의한 영향이 다르게 나타나는데 SC 토질(인천시료)에서는 흙과 흙, 조도판과 흙, 비조도판과 흙 순이며, SM 토질(의정부시료)의 경우는 조도판과 흙, 비조도판과 흙, 흙과 흙 순으로 나타났다.

부착력과 마찰각 성분을 같이 포함하여 전단 경계면에서의 저항력을 나타내는 전단저항력을 산정하여 경향을 분석해보면 다음과 같다. 부착력이나 마찰각 성분의 일관성 없는 경향과는 달리 전단저항력의 경우 접하는 흙의 단위중량과 면 거칠기에 따라 일관된 경향을 보이고 있다. 즉, 흙의 단위중량이 클수록 전단면에서의 저항력은 커지고 같은 단위중량에서의 크기는, SC 토질의 경우 면의 거칠기에 따

라 조도판과 흙, 흙과 흙, 비조도판과 흙 SM 토질의 경우 면의 거칠기에 따라 흙과 흙, 조도판과 흙, 비조도판과 흙 사이에서의 저항력 순이다.

여기서 중요한 사항을 알 수 있는데 말뚝과 흙이 접하는 면에서의 전단저항력의 측정은 일반적인 국내지반 토사의 경우 마찰각 성분이나 부착력 성분만을 가지고 산정하는 것은 오류를 포함할 우려가 많으므로 두가지 성분을 포함한 전단저항력을 측정하거나 예측하는 방안을 모색하는 것이 바람직한 것으로 보여진다.

3.2 최대주면저항력 산정식

전단저항력의 특성을 살펴보기 위하여 경계면에서의 최대전단저항력과 수직하중, 흙의 단위중량과의 관계를 살펴보면 그림 12, 그림 13와 같다. 이 그림들을 잘 살펴보면 아주 중요한 정보를 제공하고 있는데 전단면에 작용하는 수직하중이 최대전단저항력에 미치는 영향이 월등히 크다는 것이다. 즉, 깊이별로 지중응력이 차이가 나는 것은 명확한 사실이며 그에 따라 말뚝 표면에 작용하는 수직하중이 차이가 나는 것이 주면 저항력에 가장 큰 영향을 주는 인자이므로 이런 특성을 고려한 주면 설계 지지력 산정이 반드시 필요하다고 사료된다. 또한 흙의 밀도에 따라서도 주면전단저항력 값이 영향을 받는 것으로 측정되었다.

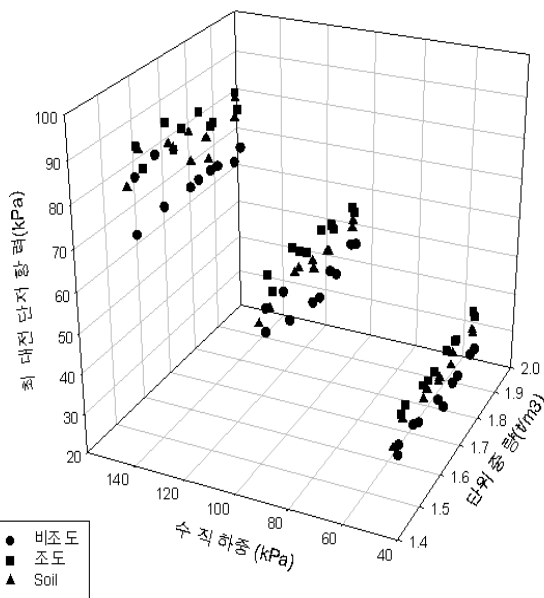


그림 12. 최대 주면전단저항력(인천시료)

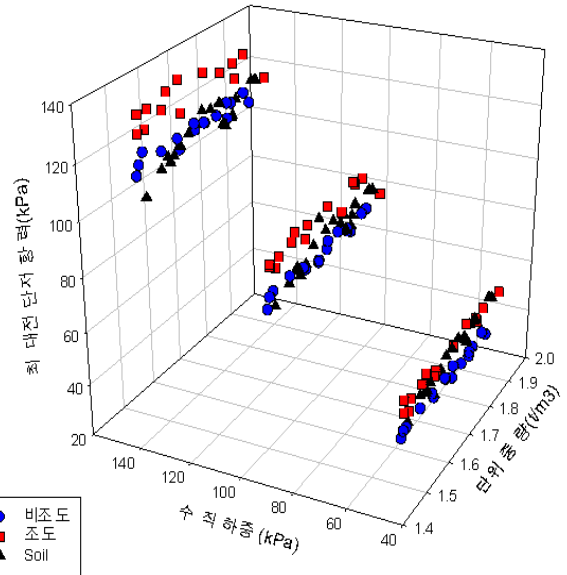


그림 13. 최대 주면전단저항력(의정부시료)
이러한 특성을 고려하여 말뚝표면에 작용하는 수직하중과 실제 자연조건에서 말뚝표면에 작용하는 수직하중에 영향을 주는 단위중량을 인자로 하는 SIP 말뚝의 주면저항력 산정식을 제시해 보고자 하였다.

실험 결과를 토대로 SM 과 SC 토질과 접하는 SIP 말뚝의 주면전단저항력 추정식을 제시해보면 다음과 같다.

SM 토질에서의 SIP말뚝 주면전단저항력

$$\tau_s = 16.5 - 4.8\gamma + 0.8\sigma_n \quad (2)$$

SC 토질에서의 SIP말뚝 주면전단저항력

$$\tau_s = 27.6 - 6.5\gamma + 0.4\sigma_n \quad (3)$$

여기서, τ_s : 단위 주면전단저항력(kPa)

γ : 흙의 단위무게(t/m^3)

σ_n : 수직응력(kPa)

4. 결론

SIP 말뚝의 주면저항 특성을 살펴보기 위해 실내 전단시험을 실시하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대 주면저항력은 경계면의 특성과 경계면에 접한 흙의 밀도에 관련이 있다. SM 토질의 경우 그 크기가 흙과 흙, 조도판과 흙, 비조도판과 흙 사이에서의 산정값 순으로 나타났으며 SC 토질의 경우에는 조도판과 흙, 흙과 흙, 비조도판과 흙 사이에서의 값 순으로 나타났다. 흙의 밀도에 따른 마찰저항력 값의 변화는 모든 경우에 밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 경계면에서의 저항력을 부착력과 마찰각으로 분리하는 경우 부착력의 경우 경계면 흙의 밀도에 따라 증가하는 경향을 보이나 마찰각의 경우 변화가 없거나 감소하는 경향을 나타내며, 부착력의 경우에도 표면이 매끈한 비조도면의 경우 흙의 밀도에 따른 부착력의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

경계면에서의 부착력과 마찰저항각의 경향이 다양하게 나타난다. 그러나 부착력과 마찰저항각 성분을 포함한 주면마찰저항력의 경우 비교적 일목요연한 경향을 보여 주므로 향후 SIP 말뚝에서와 같은 경계면에서의 주면마찰저항력 산정이나 측정에는 부착력과 마찰저항각의 분리가 아니라 전체값인 주면마찰저항력을 고려하는 것이 효과적이다.

4. 말뚝 주면저항력의 산정에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 인자는 말뚝표면과 흙 전단면에 작용하는 수직응력이며 SIP 말뚝의 경우 천공작업에 따른 표면거칠기 양상은 같은 종류의 지반에서는 어느 정도 일정한 양상을 띠므로 국내지반의 대표적인 토질인 SM, SC 토질에서 흙의 밀도와 전단면의 수직응력을 고려한 SIP 말뚝의 최대 주면저항력 산정식을 제안하였다.

(접수일자 : 2001. 12. 22)

참 고 문 헌

1. 김용필 등(2000), 지반공학 시험법 및 응용, 세진사. pp. 381-389.
2. 대한주택공사(2001), SIP공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구, pp. 1~13.
3. Lambe, T.W. and Whitman, R.V.(1979), "Soil mechanics", Wiley, New York, N.Y. 127p., 139p.
4. Joseph E.Bowels.(1982), "Foundation Analysis and Design-Third Edition", McGraw-Hill International Book Company, pp. 602~608.

3. 같은 토질에서도 흙의 밀도와 접촉면의 거칠기에 따라