

SIP말뚝의 주면저항력 예측 모델 제안

Suggestion of Evaluation Formula for Skin Resistance of SIP

정형식* · 임해식** · 김정수***

Chung, Hyung-Sik · Lim, Hae-Sig · Kim, Jung-Soo

Abstract

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

However, a proper bearing capacity evaluation formula has not been suggested, yet. In order 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 nonlinear unit skin resistance capacity model and relative parameters evaluation formula with SM, SC soil were 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 SIP말뚝 주면과 지반사이의 경계면에 대하여 직접전단 시험을 실시하였다.

시험 결과를 토대로 통일분류상 SM, SC 지반에서의 SIP말뚝 주면저항력 특성을 고찰하고 해당 지반에서 주면저항력 산정식을 제시하였다. 또한, 말뚝 경계요소의 저항력에 대한 새로운 비선형 수치 모델식과 계수산정식을 제안하였다.

주요어 : SIP, 주면저항력, SIP말뚝 경계면

* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사

** 정회원 · 대한주택공사 주택도시연구원 과장 · 공학박사

*** 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

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

SIP공법의 특성상 지지력 발휘는 일반 직항타 말뚝과는 다른 특성을 나타낸다. 특히 SIP공법에서는 말뚝 주면부의

조건이 직항타 말뚝과 큰 차이를 보인다. 그러나 아직까지 객관적인 근거를 토대로한 매입말뚝 고유의 설계 지지력 산정식은 없는 실정이다. SIP공법 발원지인 일본에서는 주로 표준관입 시험결과인 N값을 이용한 공식을 사용하며 기관별로 기준이 다르다. 국내에서는 이들 산정식을 주로 준용하고 있는 실정이며 이들을 표 1 에 나타내 보았다. 특히 SIP말뚝의 지지력 특성은 시공, 양생, 시멘트 페이스트 배합등 여러 요인에 의해 영향을 받으므로 많은 시험자료의 분석을 통한 정확한 지지력 산정이 요구된다.

본 연구에서는 이와 같은 문제 해결에 기여하기 위해 SIP말뚝 주면과 지반사이의 저항력을 실내 직접전단시험으로 측정하여 경향을 분석하였다.

시공법	선단지지력 산정법	말뚝선단부의 조건	주면마찰력의 산정식	말뚝주면부의 조건	비고
타격공법	$R_p = 30 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \Pi$ $\bar{N}_s \leq 50,$ $\bar{q}_u \leq 20 \quad (\bar{q}_u = 1.25N)$	L_s, L_c : 각 사질, 점성지반에의 근입 길이 \bar{N}_s : 사질지반의 평균 N Π : 말뚝의 주변장 \bar{q}_u : 점성토의 일축압축강도	건설성 고시기준
시멘트풀 주입공법	$R_p = 20 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 50$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \Pi$ $\bar{N}_s \leq 25,$ $\bar{q}_u \leq 10 \quad (\bar{q}_u \leq 1.25N)$		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 직접전단 시험

SIP말뚝의 주면저항력 특성을 규명하기 위한 시험방법으로는 여러 가지 방법이 있을수 있으며, 각 방법들마다 각각의 장단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 SIP말뚝의 주면저항력 특성을 실내시험중 직접전단시험으로 검토했다.

SIP말뚝의 표면을 실내 시험시 재현하기 위하여 전형적인 SIP공법으로 시공된 SIP말뚝을 파내서 그 표면을 본을 뒀다. 현장에서 사진에서와 같이 식물성 실리콘을 이용하여 표면의 본을 뜬 후 실리콘 요철판을 시험실에서 실리콘



사진 1. SIP 말뚝 표면 본뜨기

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.

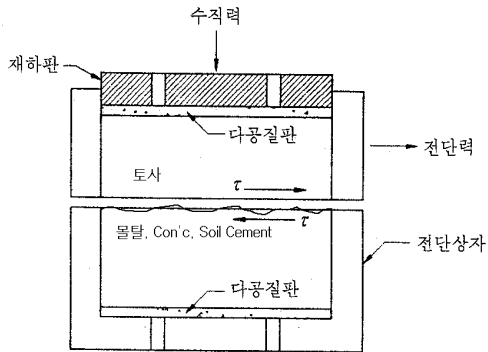


그림 1. 직접전단시험 개요도

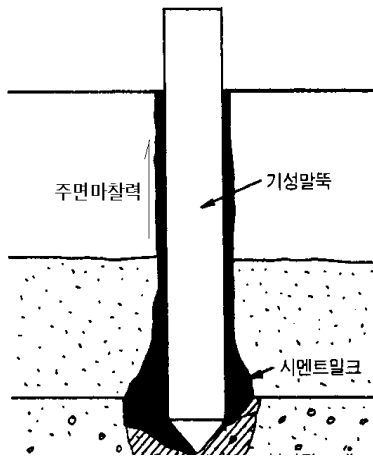


그림 2. SIP 말뚝 주면저항력 개념

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 3과 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 SIP말뚝의 실제 요철면에 본을 떠 시멘트 밀크로 성형시켜 제작하였고, 비조도판은 요철이 없는 시멘트 몰탈로 성형 제작하였다. 시험은 변형 제어 방식으로 전단속도는 $\dot{\epsilon}_h = 2\%$ 인 약 2mm/분으로 하였으며 전단시험중 공시체의 최대강도값이 나타나지 않을 때에는 변위 약 10mm 전단상태에서의 값을 최대값으로 채택하였다(김용필 등, 2000).

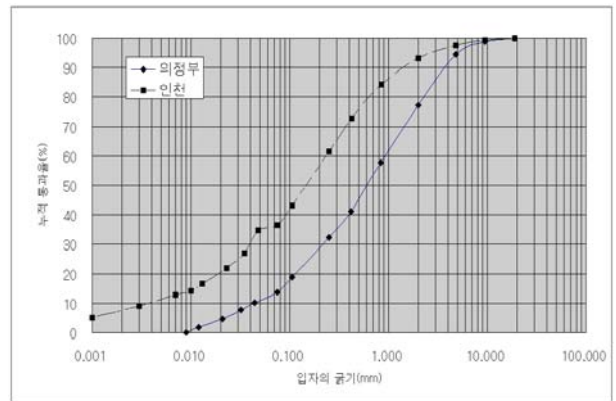


그림 3. 입도분포곡선

표 3. 실내 직접전단시험 개요

구 분	내 용	비 고
시험 종류 및 시험 횟수	· soil-soil (29회) · soil-조도판 (25회) · soil-비조도판 (25회)	· 파괴면의 경계를 3종류로 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	· 1.5tf/m ³ ~1.9tf/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 4와 같다. 이 그림은 매끈한 말뚝 표면과 접한 흙에 대한 직접전단시험 측정 결과를 예시한 것으로 수행된 실내시험에 대해 전반적인 거동 형태는 유사하였다.

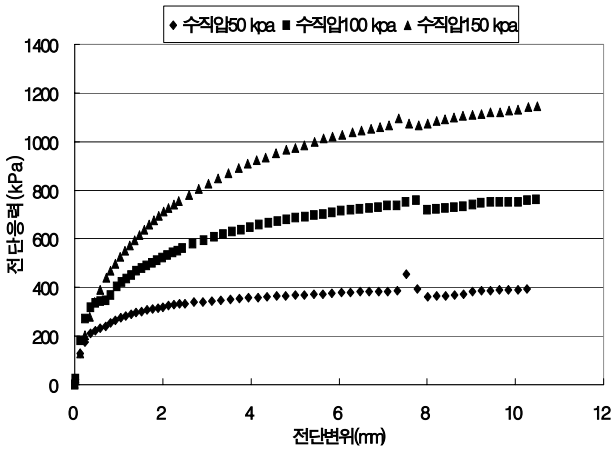


그림 4. 전단변형-응력 관계곡선

3.1 실내시험결과 분석

전단저항력의 특성을 살펴보기 위하여 경계면에서의 최대전단저항력과 수직하중, 흙의 단위중량과의 관계를 살펴보면 그림 5, 그림 6과 같다. 이 그림들을 잘 살펴보면 아주 중요한 정보를 제공하고 있는데 전단면에 작용하는 수직하중이 최대전단 저항력에 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 주면전단저항력값이 영향을 받는 것으로 측정되었다

3.2 최대주면저항력 산정식

이러한 특성을 고려하여 말뚝표면에 작용하는 수직하중과 실제 자연조건에서 말뚝표면에 작용하는 수직하중에⁵⁾ 영향을 주는 단위중량을 인자로 하는 SIP말뚝의 주면저항력 산정식을 제시해 보고자 하였다.

실험 결과를 토대로 SM 과 SC 토질과 접하는 SIP말뚝의 최대 주면전단저항력 추정식을 제시해보면 다음과 같다.

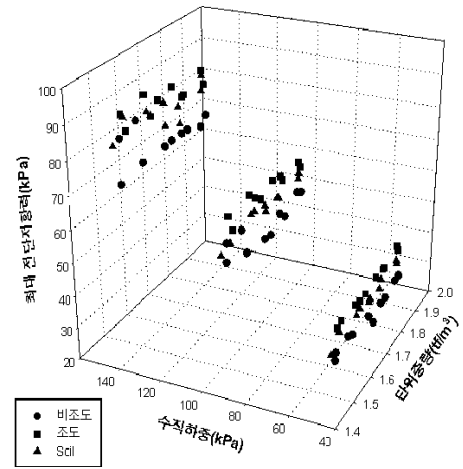


그림 5. 최대 주면전단저항력(인천시료)

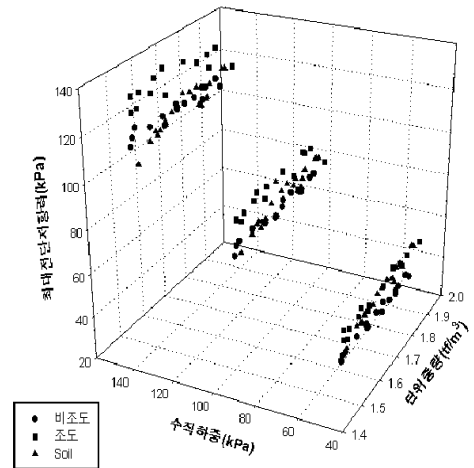


그림 6. 최대 주면전단저항력(의정부시료)

SM 토질에서의 SIP말뚝 주면전단저항력

$$\tau_s = 16.5 - 4.8\gamma + 0.8\sigma_n \quad (1)$$

SC 토질에서의 SIP말뚝 주면전단저항력

$$\tau_s = 27.6 - 6.5\gamma + 0.4\sigma_n \quad (2)$$

여기서, τ_s : 단위 주면전단저항력(kPa)

γ : 흙의 단위중량(tf/m³)

σ_n : 수직응력(kPa)

4. 새로운 비선형 수치모델의 제안

4.1 경계요소의 전단저항 거동 모델 특성

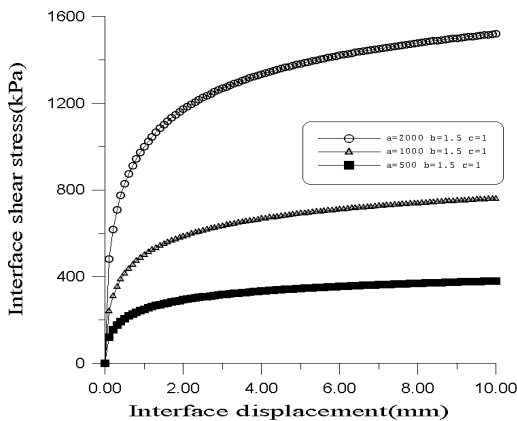
본 연구에서의 실험결과를 살펴보면 SIP말뚝표면과 지반 사이에서의 전단 변형률-응력 특성은 밀도와 구속압에 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다. 이 관계를 하나의 함수식으로 표시하기 위하여 수많은 시행착오를 거쳐 가장 적합한 식 (3)을 제시하였다⁶⁾. 제안된 함수식의 특성은 그림 7과 같다.

$$\tau = \frac{a\Delta_s^c}{b + \Delta_s^c} \quad (3)$$

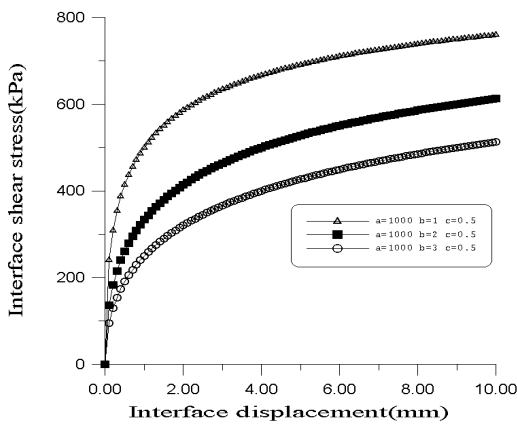
여기서, τ = 전단 저항력(kPa)

Δ_s = 전단 변형량(mm)

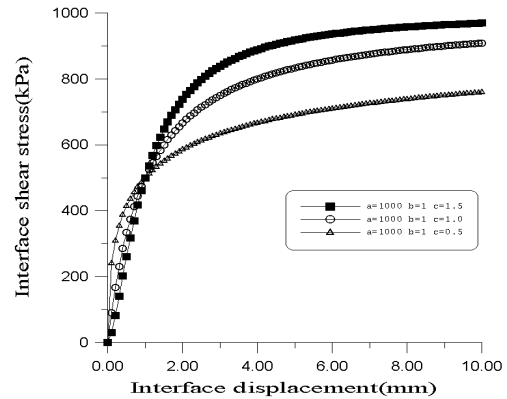
a, b, c = 계수



(a) 계수 a의 특성



(b) 계수 b의 특성



(c) 계수 c의 특성

그림 7. 제안된 함수식의 특성

4.2 새로운 전단저항 거동 모델의 계수

각각의 전단 변형률-전단저항력 데이터를 식 3의 함수식으로 회귀분석하여 계수 a, b, c를 구한 후 a, b, c값을 다양하게 분석한 결과 계수 a, b, c값은 경계면에 접하는 흙의 단위중량과 구속압에 밀접한 연관성을 가지며 따라서 식 3의 계수들은 식 4, 5에서와 같이 경계면에 접하는 흙의 밀도와 구속압을 변수로 하는 일련의 함수식으로 나타낼 수 있었다.

식 3에서 제시된 계수들의 흙의 단위중량과 구속압과의 연관성을 그림 8, 9에 나타내었다.

SM 토질에서의 새로운 비선형모델 계수 산정식

$$\begin{aligned} a &= 239.77 - 23.47\gamma + 0.31\sigma_n \\ b &= 15.98 - 2.24\gamma - 0.06\sigma_n \\ c &= 0.60 - 0.12\gamma + 0.0014\sigma_n \end{aligned} \quad (4)$$

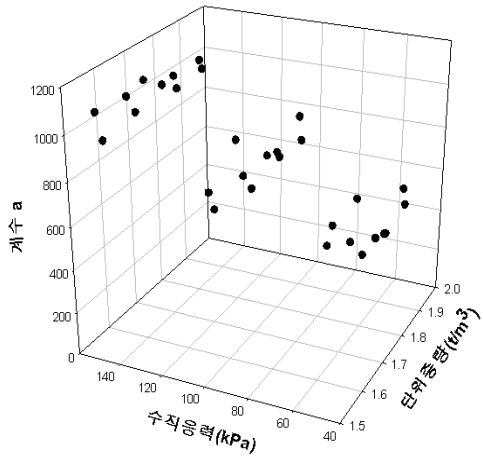
SC 토질에서의 새로운 비선형모델 계수 산정식

$$\begin{aligned} a &= 92.67 - 32.08\gamma + 0.43\sigma_n \\ b &= 9.15 - 3.68\gamma - 0.0081\sigma_n \\ c &= 0.70 - 0.08\gamma + 0.0018\sigma_n \end{aligned} \quad (5)$$

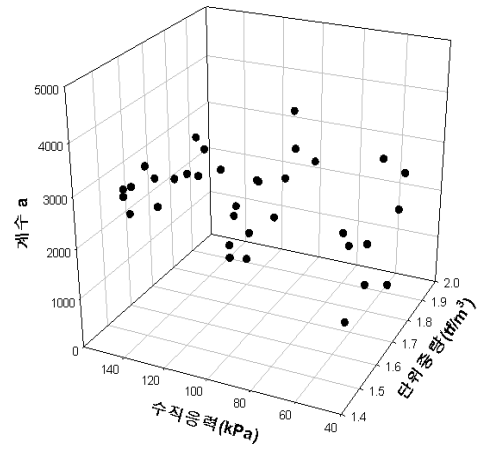
여기서, γ : 흙의 단위중량(tf/m^3)

σ_n : 수직응력(kPa)

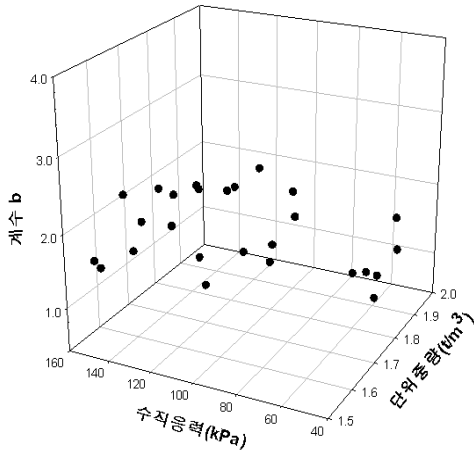
식 4, 5에 의해 산정된 계수값에 의해 묘사되는 SIP말뚝 경계면에서의 전단응력-변형거동을 실험값과 비교한 결과중 대표적인 것을 그림 10, 11에 나타내었다. 그림을 잘 살펴보면 제시된 전단저항 거동 예측 모델이 경계면에서의 비선형 전단저항 거동을 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있다.



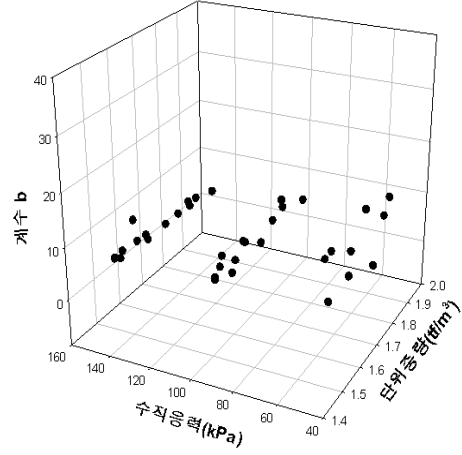
(a) 계수 a의 경향



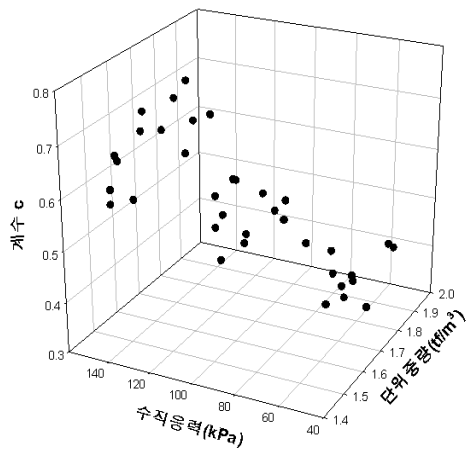
(a) 계수 a의 경향



(b) 계수 b의 경향

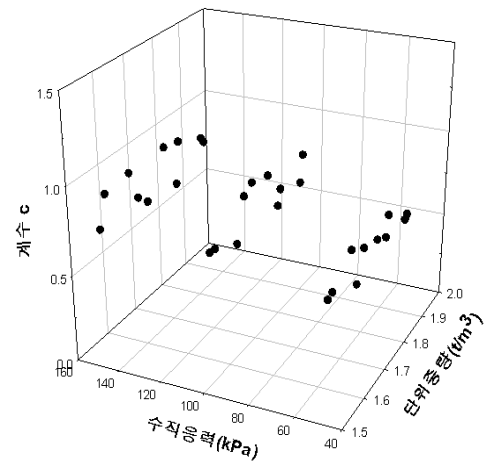


(b) 계수 b의 경향



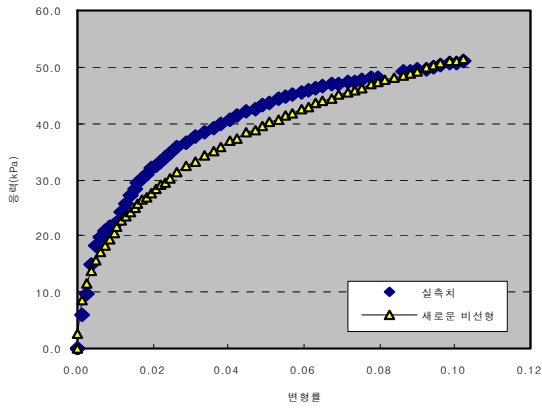
(c) 계수 c의 경향

그림 8. SM 토질의 계수 경향

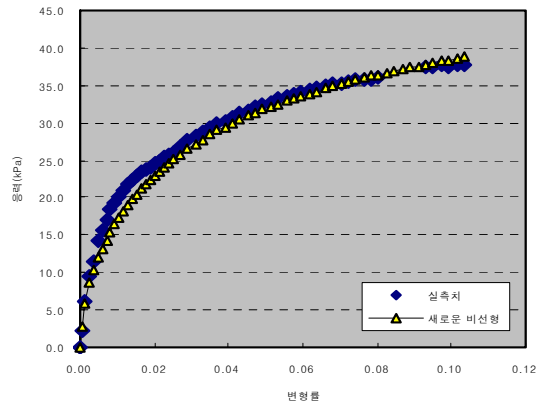


(c) 계수 c의 경향

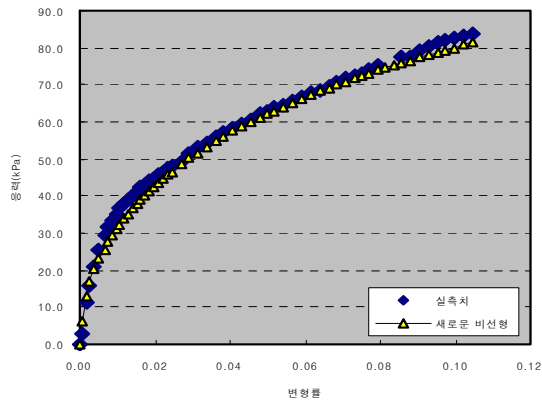
그림 9. SC 토질의 계수 경향



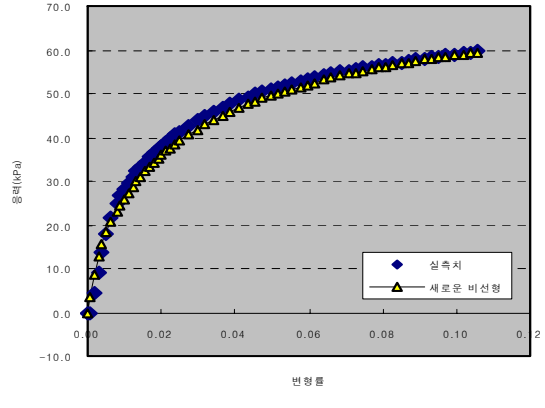
(a) 수직응력 50 kPa



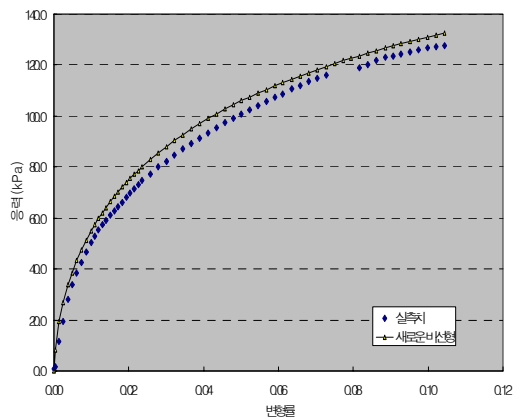
(a) 수직응력 50 kPa



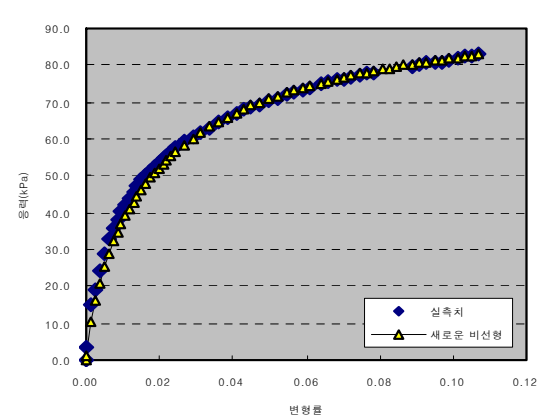
(b) 수직응력 100 kPa



(b) 수직응력 100 kPa



(c) 수직응력 150 kPa



(c) 수직응력 150 kPa

그림 10. 단위중량 1.796 tf/m^3 , SM 토질의 실측치와 예측모델 비교

그림 11. 단위중량 1.92 tf/m^3 , SC 토질의 실측치와 예측모델 비교

5. 결론

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

1. 같은 토질에서도 흙의 밀도와 접촉면의 거칠기에 따라서 경계면에서의 부착력과 마찰저항각의 경향이 다양하게 나타난다. 그러나 부착력과 마찰저항각 성분을 포함한 주면마찰저항력의 경우 비교적 일목요연한 경향을 보여주므로 향후 SIP말뚝 에서와 같은 경계면 에서의 주면마찰저항력 산정이나 측정에는 부착력과 마찰저항각의 분리가 아니라 전체값인 주면마찰저항력을 고려하는 것이 효과적이다.
2. 말뚝 주면저항력의 산정에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 인자는 말뚝표면과 흙 전단면에 작용하는 수직응력이며 SIP말뚝의 경우 천공작업에 따른 표면 거칠기 양상은 같은 종류의 지반에서는 비교적 일정한 양상을 띠므로 국내지반의 대표적인 토질인 SM, SC 토질에서 흙의 밀도와 전단면의 수직응력을 고려한 SIP말뚝의 최대 주면저항력 산정식을 제안하였다.
3. SIP말뚝의 주면저항력 거동을 묘사하는 새로운 비선형 모델식을 제안하였다.
4. 실험 결과를 토대로 새로이 제시된 SIP말뚝의 주면저항력 거동을 묘사하는 새로운 비선형 모델식의 국내 주요 토질에 대한 산정식을 제시하였다.

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. 천병식 외(2000), 지반공학 -이론과 실제-, 구미서관, 27p, pp. 312~314
4. Head K. H.(1982), manual of soil laboratory testing Vol. 2, ELE Internation Limited, London, pp. 542~562.
5. Joseph E.Bowels.(1982), Foundation Analysis and Design-Third Edition, McGraw-Hill International Book Company, pp. 602~608.
6. Jesus E. Gomez, George M. Filz, and Robert M. Ebeling.(2000), Development of an improved numerical model for concrete-to-soil interfaces in soil-structure interaction analyses, U.S. Army Corps of Engineers, pp. 20~27.
7. Lambe, T.W. and Whitman, R.V.(1979), Soil mechanics, Wiley, New York, N.Y. 127p., 139p.