

다층토 지반에서 매입말뚝(SIP)의 신뢰성 연구 The Reliability of SIP Pile in Layered Ground

이민선¹⁾, Min-Sun Lee, 황의석²⁾, Eui-Seok Hwang, 이봉열³⁾, Bong-Youl Lee, 김학문⁴⁾, Hak-Moon Kim

¹⁾ 단국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

²⁾ 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

³⁾ 시지E&C(주) 기술연구소 소장, General Manager, R&D Center, C.G. E&C Co., Ltd

⁴⁾ 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University.

SYNOPSIS : Rapid urbanization of many cities require large scale constructions such as high rise buildings in difficult ground conditions. SIP(Soil-cement Injected Precast pile) type piles are the most popular choice of foundation method in soft ground as well as layered ground in many cities in Korea since SIP offer negligible amount of noise and vibration. But SIP method of construction provide wide range of pile capacity depending on the construction method, equipment, ground conditions and quality control method etc.

Therefore this paper intend to investigate the reliability of SIP pile in layered ground through a comparison of existing design formulars and SIP pile load test.

Key words : SIP Pile, layered ground, reliability, pile load test

1. 서론

최근 건축 용지의 부족으로 인해 건축물의 대형화, 초고층화 등으로 구조물이 증량화되고 있는가 하면, 연약한 토층은 물론이고 더욱 열악한 지반조건에서 구조물을 시공하는 사례가 늘어나고 있으며, 그 결과 말뚝의 대구경화, 장대화 등의 신기술이 개발되고 있다. 하지만 사회가 발전함에 따라 사람들도 더욱 쾌적하고 좋은 환경속에서 살아가려는 욕구 때문에 환경문제에 대한 인식이 향상되어 소음 및 지반 진동으로 인한 민원이 많이 일어나고 있다.

그 대책으로 건설공사에 대한 저소음·저공해 시공법인 매입말뚝(Soil-cement Injected Precast pile, SIP)이 많은 현장에서 이용되고 있지만 현재까지도 이 공법의 확실한 지지력의 특성이 규명되지 않아 많은 문제점을 내포하고 있다.

본 연구는 SIP 말뚝의 지지력 공식을 합리적으로 제안하기 위해 국내 16개 현장에서 시공된 30개소의 말뚝에 수행된 정재하시험 결과와 13개 현장에서 시공된 55개소 말뚝에 대한 동재하시험 결과로부터 얻은 극한지지력과 기존 지지력 공식으로부터 얻은 극한지지력을 비교하여 회귀분석을 실시하였다.

2. 매입말뚝(SIP) 공법

2.1 시공방법 및 말뚝지지 메카니즘

SIP 공법은 소요 말뚝구경보다 5~10cm 정도 큰 직경의 오거로 천공하며, 굴진시 오거 로드(Auger

Rod)를 통해 굴착액(Cement Paste)을 주입하여 원지반토와 교반한다. 굴착액의 사용목적은 굴착을 용이하게 해주며 동시에 굴착공벽을 보호하기 위함이다. 공벽유지가 어려울 경우에는 벤토나이트(Bentonite)를-시멘트와 함께 사용한다. 지지층 부근에서는 부배합의 고정용 굴착액을 주입하여 원지반토와 충분히 교반하므로써 확장된 선단지지층으로 사용할 수 있게 한다. 오거굴착 및 인발시 주입하는 말뚝 주변 고정용을 위한 굴착액의 역할은 말뚝지지력 측면에서 보면 주변마찰력을 증대시켜주는 것이다.

교반작업이 완료되면 기성말뚝을 자중에 의해 굴착공에 삽입한 후, 선단부 1.0~1.5m를 경타에 의해 타입시키므로 말뚝 선단부가 이완되지 않고 오히려 더욱 정밀해지도록 하는 효과를 얻는다. 이렇게 함으로써 말뚝 선단부의 지지력이 증대될 뿐만 아니라 말뚝 주변의 마찰력이 항타말뚝 보다 오히려 크게 나타나 말뚝 본체의 지지력을 충분히 발휘할 수 있게 된다.

그러나, 선단부의 부배합 고정액에 대한 시공관리가 까다로워 지지력 확보에 실패한 사례가 발생함에 따라, 최근 국내에서는 부배합 고정액을 사용하는 대신 선단지지층까지 마무리 항타를 실시하여 원지반상에 지지시키는 방법을 주로 사용하고 있다. 이 방법은 시공과정을 단순화하여 시공비를 줄일 수 있으며, 얇은 깊이에 암반층이 분포하고 있는 우리나라의 지반조건에 잘 맞는다는 이점이 있다.

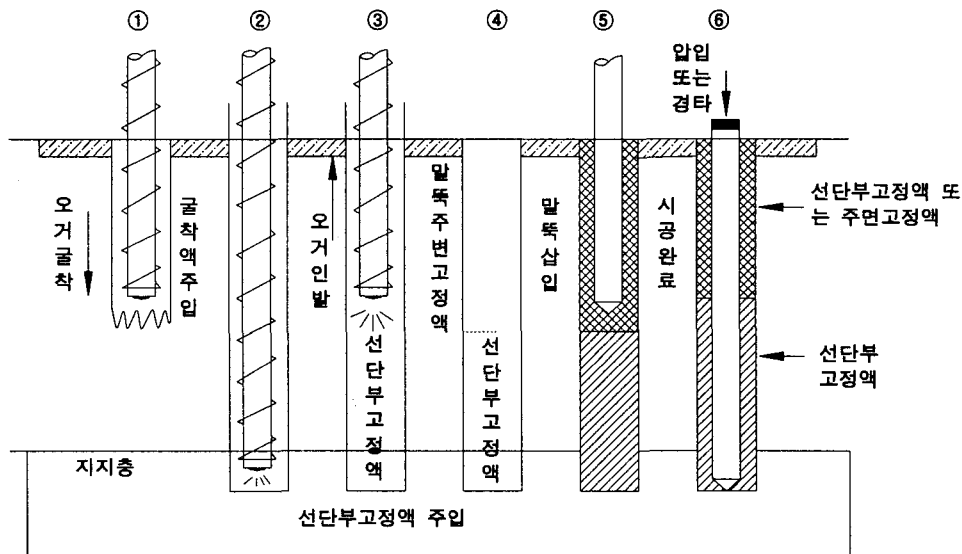


그림 1. 매입말뚝(SIP)의 시공 순서

2.2 SIP 말뚝의 극한지지력 산정

SIP 말뚝의 지지력을 결정하는 방법에는 신뢰성이 가장 높은 재하시험에 의한 방법으로부터, 토질역학이나 암반역학 등 지반공학의 이론에 근거를 두고있는 정역학적인 방법, 콘관입시험이나 프래셔미터 등의 원위치시험에 의한 방법, 항타말뚝에 대한 동역학적 및 파동방정식에 의한 방법 등 여러 가지가 있다. 다음에 열거되는 3가지의 정역학적 지지력 공식과 3가지의 동역학적 지지력 공식으로 계산하여 현장의 재하시험 결과와 비교하였다..

2.2.1 정역학적 지지력 산정공식

설계에 사용되는 극한지지력은 국내의 도로교 하부구조 설계요령에 제시된 식 (1), 일본 도로교 시방서와 건축학회에 제시된 식 (2), (3)을 이용하여 다층토의 SIP 말뚝의 신뢰도 해석을 실시하였다.

$$R_u = q_d \cdot A_p + U \sum l_i f_i \quad (1)$$

q_d : 15N(≤750) 사질토층(tf/m²)

20N(≤1000) 모래자갈층

f_i : 0.1 \overline{N}_s (≤5) 사질토층(tf/m²)

0.5 \overline{N}_c (≤10) 점성토층

$$R_u = q_d \cdot A_p + U \sum l_i f_i \quad (2)$$

q_d : 10N(≤400) 사질토층(tf/m²)

15N(≤600) 모래자갈층

f_i : 0.1 \overline{N}_s (≤5) 사질토층(tf/m²)

0.5 \overline{N}_c (≤15) 점성토층

$$R_u = 20 \overline{N} A_p + \left[\frac{1}{5} \overline{N}_s L_s + 2 \overline{N}_c L_c \right] \phi \quad (3)$$

$\overline{N} \leq 60, \overline{N}_s \leq 25, \overline{N}_c \leq 4$

여기서, R_u : 지반조건에 따라 결정되는 말뚝의 극한지지력(t)

q_d : 말뚝 선단에서 지지하는 단위면적당의 극한지지력(t/m²)

A_p : 말뚝 선단 면적(m²), U, ϕ : 말뚝의 둘레 길이(m)

l_i : 주변마찰력을 고려한 i층의 두께(m)

f_i : 주변마찰력을 고려하는 i층의 최대 주변마찰력(t/m²)

N : 말뚝선단부의 N값, \overline{N}_s : 사질토층의 평균 N값

\overline{N}_c : 점성토층의 평균 N값, L_s : 사질토층에 관입된 말뚝길이(m)

L_c : 점토층에 관입된 말뚝길이(m)

2.2.2 동역학적 지지력 산정공식

말뚝의 동역학적 지지력 산정법에는 Hiley, Janbu, Gates, ENR 공식 등 많은 것들이 있는데 이 중에서도 비교적 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있는 Gates 공식 (4), Danish 공식 (5)와 항타장비의 해머효율과 안전율에 영향을 받지 않고 지지력을 구할 수 있는 일본 건설성 고시식 (6)을 사용하여 신뢰도 분석을 실시하였다.

$$Q_u = 4.0 \sqrt{e_h \cdot W_r \cdot H} \log\left(\frac{25}{S}\right) \quad (4)$$

$$Q_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S + C_1} \quad (5)$$

$$R_a = \frac{2W_h \cdot H}{5s + 0.1} \quad (6)$$

3. 정역학적 지지력 공식의 신뢰성 분석

3.1 전체 말뚝에 대한 극한지지력 공식의 평가

국내 여러 지역에서 서로 다른 다층토로 구성된 지반 조건에서 시행된 전체 말뚝에 대한 정재하시험 결과와 각 지지력 공식으로 구한 극한지지력과의 회귀분석을 통한 상관관계를 나타내 주고 있다. 그 결과 수정식에 의한 상관계수 값은 0.324로 가장 크게 나왔으며 다음으로 일본 건축학회, 일본 도로교 시방서, 국내의 도로교 하부구조 설계요령에 의한 상관계수 값은 0.132~0.198로 신뢰도가 상당히 낮은 것으로 나타났다.

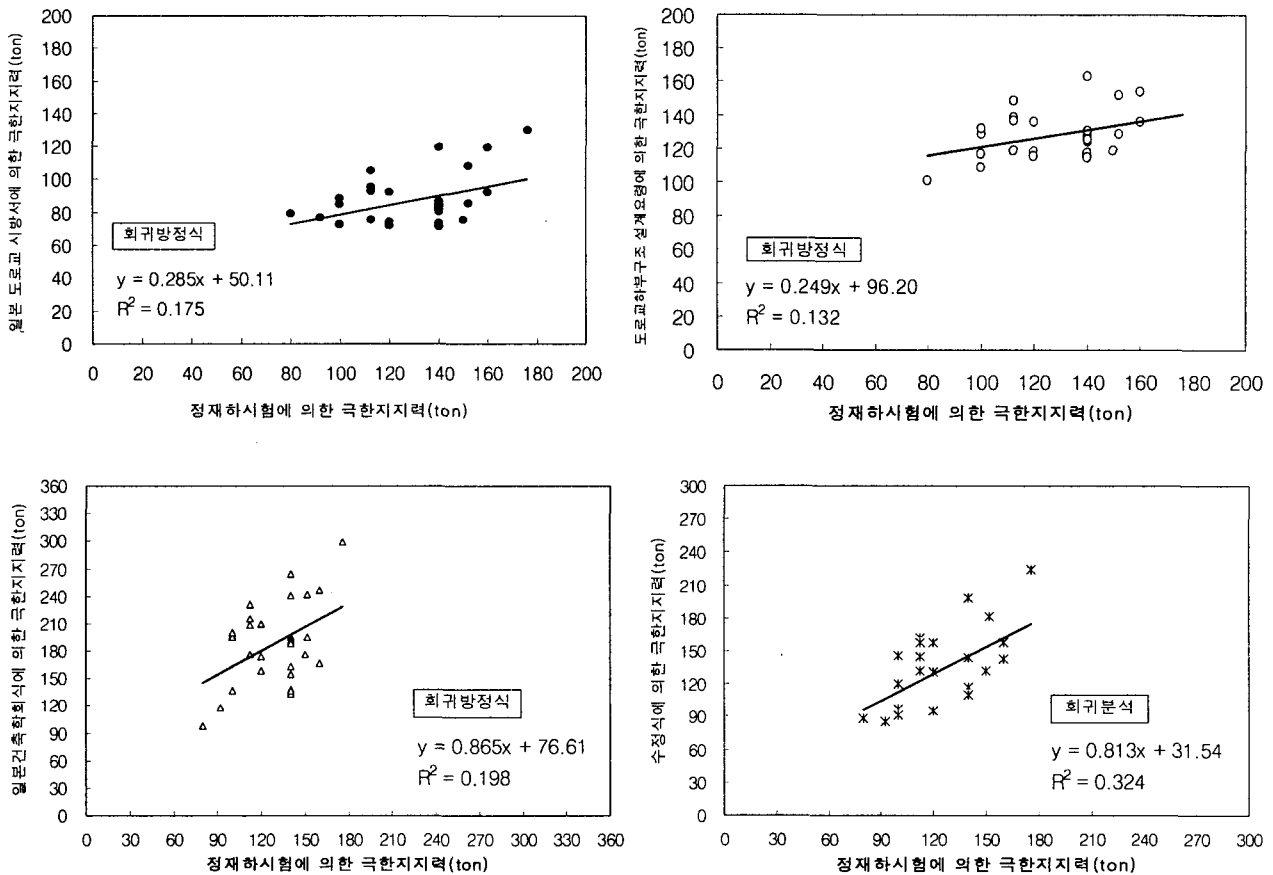


그림 2. 전체 말뚝에 대한 극한지지력 상관관계

3.2 선단부의 N값에 의한 극한지지력 평가

그림 3은 정재하시험 결과와 다층토 지반중에서도 말뚝선단부가 풍화암층 이상이며, N값이 50이상일 때의 말뚝에 대하여 지지력 산정식으로 구한 극한지지력 값과의 회귀분석을 통한 상관관계를 나타내 주고 있으며, 일본건축학회식에 의한 상관계수 값이 0.630으로 가장 크게 나타났고 도로교 하부구조 설계요령과 수정식에 의한 상관계수는 0.600, 일본도로교 시방서에 의한 상관계수는 0.450으로 적게 나타났다. 이를 보면 일본건축학회에 의한 식은 말뚝선단부의 지반조건과 강도에 많은 영향을 받고 있다고 할 수 있다.

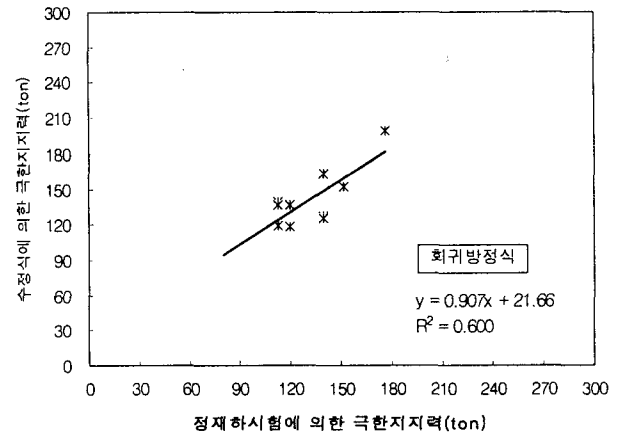
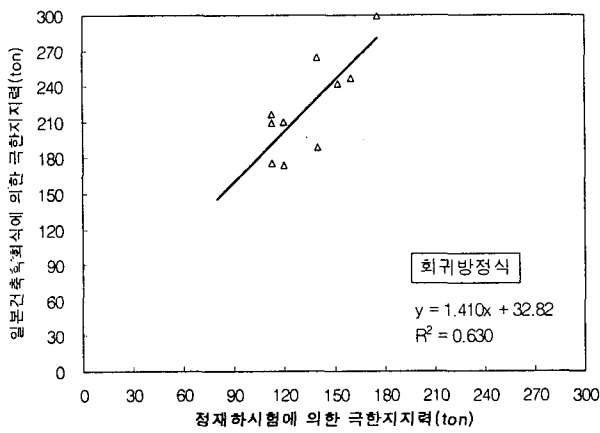
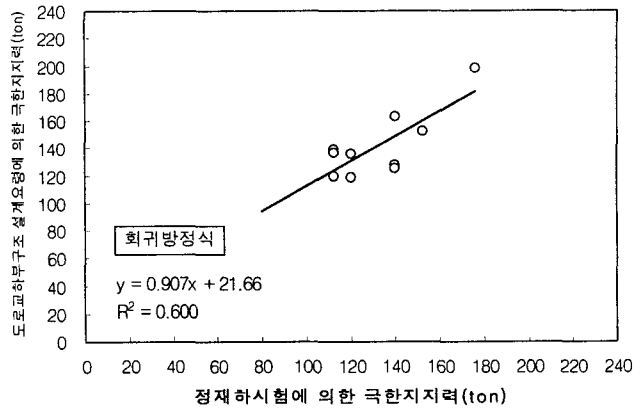
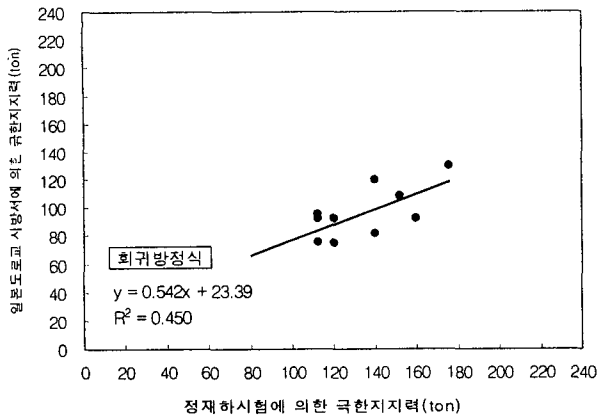
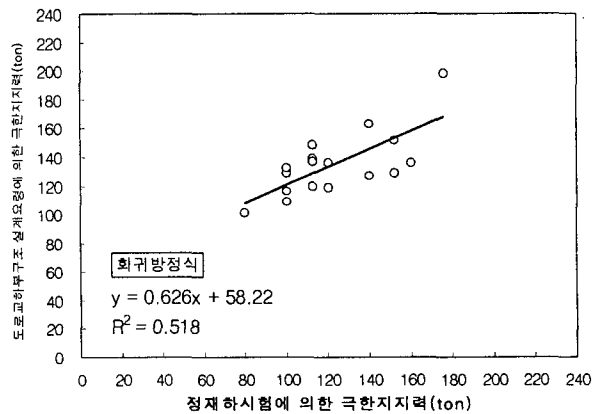
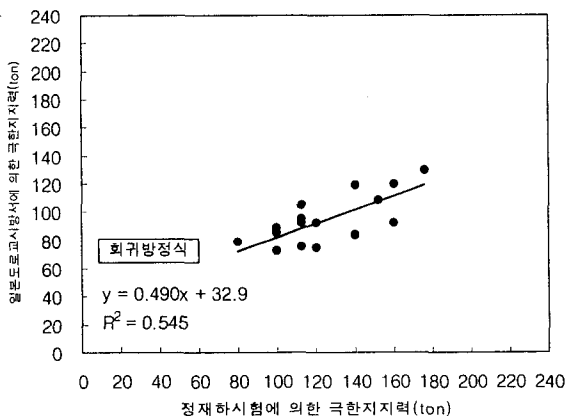


그림 3. 선단부의 N값에 의한 극한지지력 상관관계(N≥50, 풍화암이상)

3.3 사질토층내의 평균 N값에 의한 극한지지력 평가

그림 4는 정재하시험 결과와 다층토 지반중에서 사질토층이며 평균 N값이 25이상일 때의 말뚝에 대하여 지지력 산정식으로 구한 극한지지력 값과의 상관관계를 보여주고 있다. 수정식에 의한 상관계수가 0.705로 가장 크게 나왔으며 다음으로 일본 도로교 시방서, 도로교 하부구조 설계요령, 일본 건축학회의 순으로 신뢰도가 높게 나타났다. 이것으로 보아 수정식을 사질토층 내에서는 적용할 수 있을 것으로 사료된다.



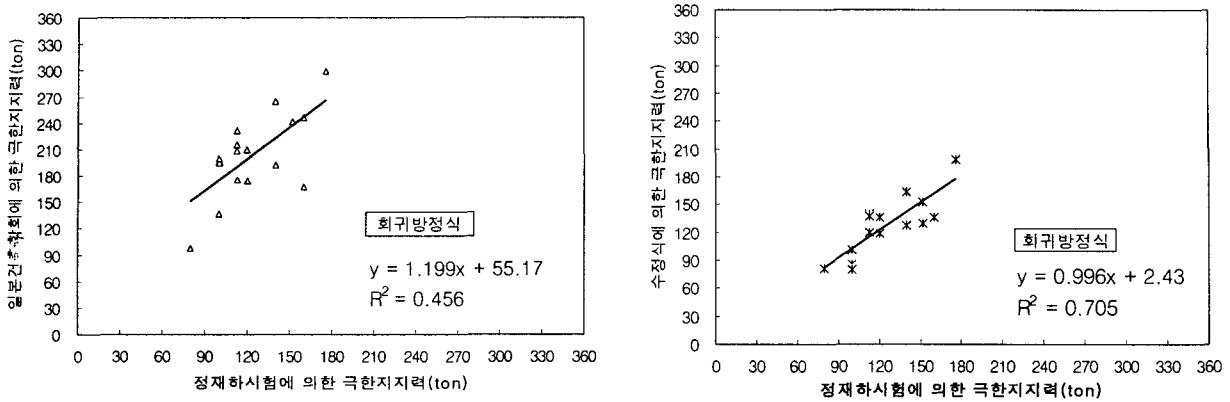


그림 4. 사질토층 내의 평균 N값에 의한 극한지지력 상관관계(N≥25)

3.4 정역학적 지지력 공식의 분석결과

그림 2~4에 보여준 회귀분석 결과 다층토 지반에 대한 SIP말뚝에서 말뚝 선단부가 풍화암층 이상이 며 N값이 50이상일 때는 일본 건축학회에 제시된 공식과 사질토층 내의 평균 N값이 25이상일 때는 수정식이 상관계수가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 분석결과는 표 1~3와 같다.

표 1. 전체 말뚝에 대한 상관관계(다층토)

적용 공식	¹⁾ 평균값(\bar{x})	¹⁾ 표준편차(σ)	¹⁾ 변동계수(σ/\bar{x})	상관계수 (R^2)
일본 도로교 시방서	0.688	0.140	0.203	0.175
도로교 하부구조 설계요령	1.018	0.172	0.169	0.132
일본 건축학회	1.478	0.336	0.227	0.198
수정식	0.942	0.181	0.192	0.324

주¹⁾ 지지력 산정식에 의한 극한지지력과 정재하시험에 의한 극한지지력과의 비 (Q_f/Q_m)에 대한 통계값

표 2. 선단부 N값에 따른 상관관계(N≥50, 풍화암이상)

적용 공식	¹⁾ 평균값(\bar{x})	¹⁾ 표준편차(σ)	¹⁾ 변동계수(σ/\bar{x})	상관계수 (R^2)
일본 도로교 시방서	0.720	0.105	0.146	0.450
도로교 하부구조 설계요령	1.055	0.134	0.127	0.600
일본 건축학회	1.661	0.194	0.117	0.630
수정식	1.055	0.134	0.127	0.600

표 3. 사질토층내의 평균 N값에 따른 상관관계(N≥25)

적용 공식	¹⁾ 평균값(\bar{x})	¹⁾ 표준편차(σ)	¹⁾ 변동계수(σ/\bar{x})	상관계수 (R^2)
일본 도로교 시방서	0.770	0.117	0.152	0.545
도로교 하부구조 설계요령	1.119	0.155	0.139	0.518
일본 건축학회	1.661	0.298	0.179	0.456
수정식	1.183	0.192	0.162	0.705

4. 동역학적 지지력 공식의 신뢰성 분석

4.1 전체 말뚝에 대한 극한지지력 공식의 평가

그림 5는 다층토 지반에서의 SIP 말뚝의 동재하시험 결과와 각 지지력 공식으로 구한 극한지지력 값과의 회귀분석을 통한 상관관계를 나타내 주고 있으며, Gates 공식에 의한 상관계수 값이 0.742로 가장 크게 나왔으며 Danish 공식과 일본 건설성 고시식은 신뢰도가 낮은 것으로 나타났다.

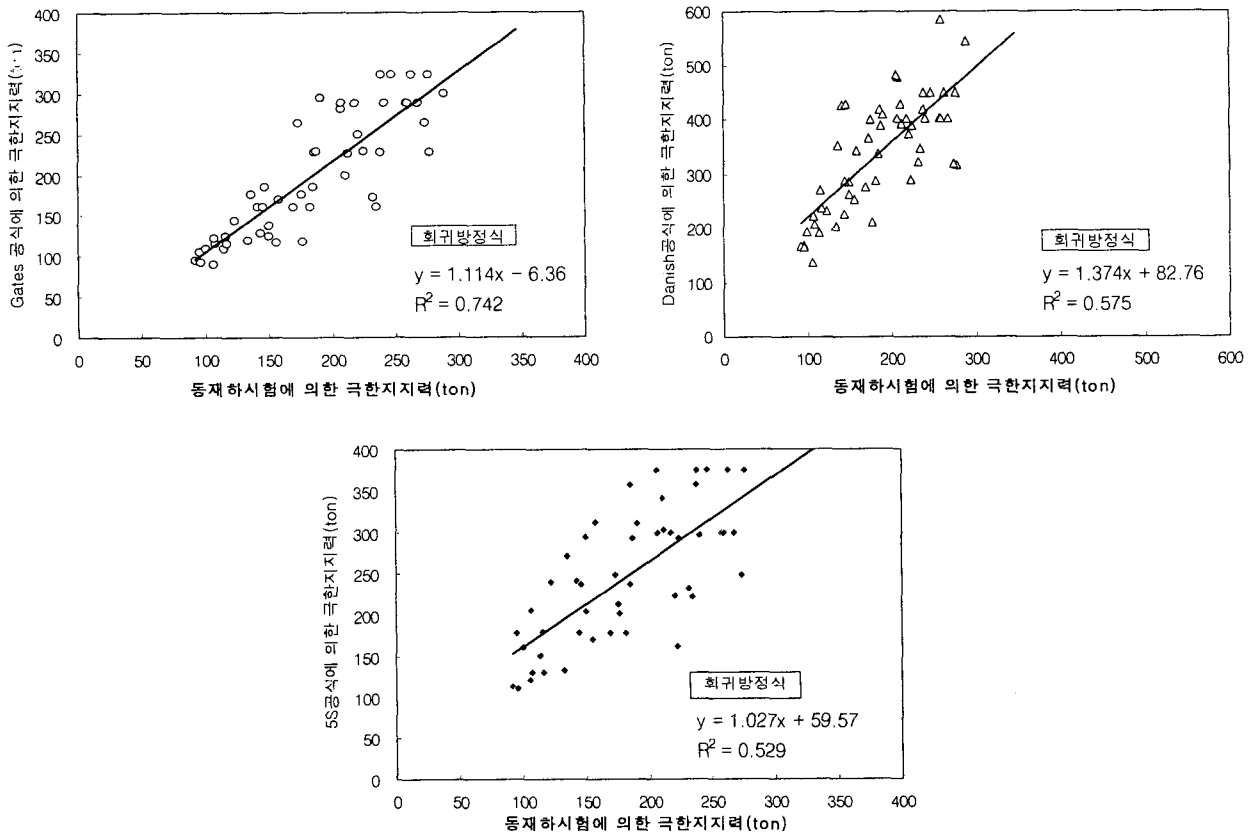


그림 5. 전체 말뚝에 대한 극한지지력 상관관계

4.2 동역학적 지지력 공식의 분석결과

동재하시험으로 얻은 극한지지력과 동역학적 지지력 공식으로 얻은 극한지지력 값을 회귀분석한 결과 Gates 공식이 상관계수가 가장 크고 Danish 공식, 일본 건설성 고시식은 신뢰성이 낮게 평가되었다. 위의 결과들을 전체적으로 요약하면 다음의 표 4와 같다.

표 4. 동역학적 지지력 공식의 상관관계

적용 공식	²⁾ 평균값(\bar{x})	²⁾ 표준편차(σ)	²⁾ 변동계수(σ/\bar{x})	²⁾ 상관계수 (R^2)
Gates 공식	1.032	0.282	0.273	0.742
일본 건설성고시식(5S식)	1.330	0.415	0.312	0.529
Danish 공식	1.767	0.493	0.279	0.575

주²⁾ 지지력 산정식에 의한 극한지지력과 동재하시험에 의한 극한지지력과의 비 (Q_f/Q_m)에 대한 통계값

5. 결론

본 연구는 다층토로 구성된 국내 16개 현장의 30개소 말뚝에 수행된 정재하시험 결과와 13개 현장의 55개소 말뚝에 대한 동재하시험 결과를 기존 제안되어 있는 정역학적, 동역학적 지지력 공식으로 얻은 극한지지력과의 회귀분석을 통한 신뢰성 평가를 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 정재하시험에 의한 극한지지력과 정역학적 지지력 공식으로 계산한 극한지지력을 회귀분석한 결과 일본 도로교 시방서와 도로교 하부구조 설계요령(1997)에 제시된 식은 말뚝이 관입된 사질토 지반의 평균 N값이 25이상일 때 신뢰도가 높게 나타났으며, 일본 건축학회에 제시된 식은 말뚝 선단부의 지반이 풍화암 이상이며 N값이 50이상일 때 신뢰도가 크게 나타났다.

(2) 동재하시험에 의한 극한지지력과 동역학적 지지력 공식으로 얻은 극한지지력들을 회귀분석한 결과 Danish공식, 일본 건설성공식보다 Gates 공식이 신뢰도가 높게 평가되었다.

(3) 다층토의 조건에서 현장 정재하시험 결과들을 회귀분석하여 다음과 같은 수정식을 얻을 수 있었다. 말뚝의 선단부가 사질토층일 때는 $R_u = 10N \cdot A_p + U \sum l_i f_i$ (단, $10N \leq 500t/m^2$)으로, 풍화암층 이상에서는 $R_u = 15N \cdot A_p + U \sum l_i f_i$ (단, $15N \leq 750t/m^2$)으로 수정하여 적용하였을 때, 신뢰도가 높게 나타났다.

(4) 기존에 제안된 지지력 공식으로 다층토 지반에 시공된 SIP 말뚝의 극한지지력을 구하여 재하시험 값과 비교 분석한 결과 신뢰도가 다소 낮게 나타나므로, 다층토 지반에 SIP말뚝 시공시 정확한 지지력을 예측하기 위해서는 향후 보다 다각적인 연구가 필요하리라 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997), 구조물 기초 설계기준
2. 사단법인 한국도로교통협회(1997), 도로교 하부구조 설계요령
3. 이명환, 윤성진(1993), "SIP시공말뚝의 지지력 특성", 한국지반공학회 대한건축학회 공동주최, pp. 91~115
4. 이인모, 조국환, 이정학(1995), "신뢰도에 근거한 말뚝의 지지력 평가" 한국지반공학회지 제11권 제1호, pp. 9~21
5. 한국지반공학회(1997), 깊은기초, 구미서관
6. Briaud, J. L. & Tucker, L. M.(1988), "Measured and Predicted Axial Response of 98 Piles", Journal of Geotechnical Eng., Vol. 114 No. 9, pp. 984~1000
7. Poulos, H. G. & Davis, E. H.(1980), "Pile Foundation Analysis and Design", Jhon Wiely and Sons, pp. 52~58
8. S.Kanai & S.Yabuuchi(1989), "Bearing capacity of nodular piles", Piling and Deep Foundations, Vol. 1, pp. 73~77
9. Tomlinson, M. J.(1994), "Pile Design and Construction Practice", Chapman & Hall, London, pp. 51~154