

말뚝 재하시험을 분석한 압입강관말뚝의 허용지지력 산정법 제안

Proposal of Bearing Capacity Evaluation Method for Pressure Penetrating Pipe (PPP) Pile Using Pile Load Test

도은수¹⁾, Eun-Su Do, 여승민²⁾, Seung-Min Yeo, 오광원³⁾, Kwang-Won Oh, 김명모⁴⁾, Myoung-Mo Kim

¹⁾ 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

²⁾ 센구조연구소, Structure Group, SEN Engineering Group

³⁾ 센구조연구소, Structure Group, SEN Engineering Group

⁴⁾ 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Pressure penetrating pipe(PPP) piles which use hydraulics jacks make it possible to check the correct pile bearing capacity and are also effective in narrow areas. In this study, pile load tests were performed to estimate the allowable bearing capacity of the PPP piles, which were installed in sand layers overlying thick weathered rocks. Using the measured data, the shaft and base resistances were determined. From the comparison of the allowable bearing capacity values between domestic specifications and those obtained from load tests, the domestic specifications underestimated the bearing capacity of PPP piles. Therefore, a method was proposed for the evaluation of the bearing capacity of PPP piles.

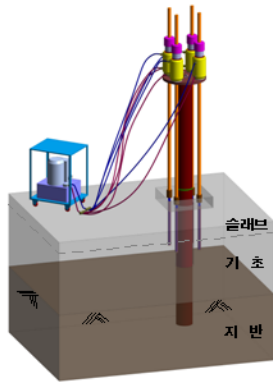
Keywords : Pressure penetrating pipe pile, Pile load test, Allowable bearing capacity

1. 서 론

건물 부지의 지반이 취약한 경우 기초공사 이전에 말뚝지정 공사를 선행하는 것이 일반적이다. 그러나 건물과 인구가 밀집된 도심지에서는 주변의 민원 때문에 가장 저렴하고 확실한 말뚝 지정공사 방식인 타입 방식이 불가능하여 대신 사전에 천공해서 삽입하는 공법을 사용하므로 말뚝공사 후 말뚝 내력 시험이 필수적인 경우가 많으며, 시공 과정에서 기초지반이 흐트러지는 경우가 많아 이를 복구 또는 정리하는 데 많은 시간과 노력이 필요하다.

또한 재건축이나 수직증축의 경우 대부분 기초에 걸리는 하중이 증가하므로 기존 기초의 내력은 상대적으로 부족해지며 지하수위의 장기적인 영향이나 주변 건물의 지하구조물 신축 등으로 인해 기존 건물의 기초가 연약화되는 경우도 많다. 이러한 경우 기존 건물의 지하 최하층에서 말뚝 지정공사를 수행하게 된다. 대부분의 말뚝 관입 관련 장비들은 긴 말뚝을 한 번에 관입하므로 위해 장비 길이가 매우 길기 때문에 기초 상부에 구조물이 있는 경우 장비의 진입과 운용이 매우 어렵다. 또한 장비를 현장에 진입시킨다 해도 기존 공법들은 공사 중 소음과 진동으로 기존 구조물에 악영향을 주거나 입주자에게 불편을 줄 수 있으며 특히 보링 후 보강말뚝을 삽입하는 공법은 말뚝의 내력을 정확히 산출해 내기가 쉽지 않다.

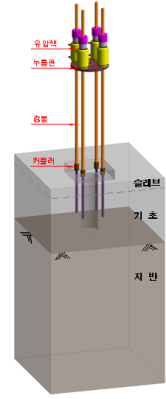
압입강관말뚝(Pressure Penetrating Pipe Pile)공법은 유압잭을 이용하여 강관말뚝을 압입 시공하는 공법으로서 유압잭의 압입하중에 의해 지반의 지지력을 확인할 수 있는 무소음, 무진동 공법으로 협소한 공간에서의 시공성이 뛰어나다. 그림 1은 압입강관말뚝의 시공 모식도와 장비상세도, 유압잭 및 유압펌프에 대해서 나타낸 그림이다.



(a) 시공모식도



(b) 유압잭 및 유압펌프



(c) 장비상세도

그림 1. 압입식강관말뚝 공법 개요

이 공법의 특징은 모든 말뚝에 대하여 유압잭의 압입하중을 이용하므로 시공 중 및 시공 후 재하시험이 용이하며, 지지력 확인이 가능하다. 또한 지반에 의한 말뚝 지지력 부족시 말뚝 길이를 연장하여 지지력을 확보 할 수 있고 상부하중에 대하여 필요한 말뚝의 최적길이를 조절할 수 있어서 경제성에서 매우 유리한 장점이 있다.

본 연구에서는 국내설계기준에서 제시하고 있는 항타 및 매입말뚝의 지지력 산정식과는 별개의 압입강관말뚝에서의 허용지지력 산정식을 제안하기 위하여, 말뚝재하시험을 수행하였다. 1본의 압입강관말뚝에 대하여 관입심도에 따라 총 8회의 급속재하시험을 수행하였으며 재하시험 결과로부터 말뚝두부 하중-침하량 곡선, 심도별 축변형률 분포 곡선 등을 얻었고, 이를 이용하여 심도별 축하중 곡선, f-w 곡선 등을 분석하였다.

2. 지반 및 재하시험 조건

그림 2는 시험말뚝 위치에서의 지반조사 결과로 표준관입시험 결과와 지층구성을 보여준다. 지층구성은 약 2m 두께의 매립층, 그 아래로 2~9m 두께의 풍화토 그리고 풍화암층이 존재한다. 심도 7m 아래로 단단한 암편을 다량 포함하여 SPT N값의 범위가 50/16~50/7로 매우 단단하였다.

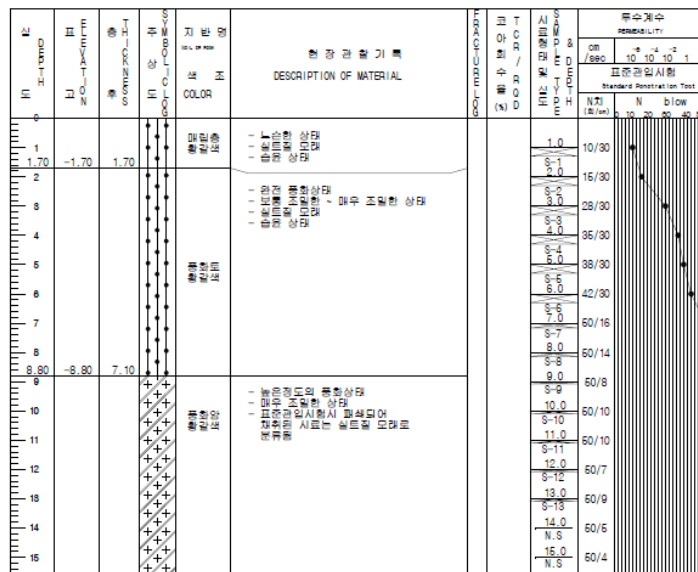


그림 2. 말뚝 재하시험 현장 지반조건

표 1은 재하시험 현장에서 심도 5m 깊이에서 채취한 시료를 이용하여 실내 시험을 수행한 흙의 기본 물성치를 나타낸 것이다. 통일분류법에 의한 분류에 의해 시료는 실트질 모래였다.

표 1. 현장에서 샘플링한 시료의 기본 물성치

심도(m)	w_n	G_s	Liquid limit (%)	Plastic index	USCS
5.0	23.14%	2.62	28.4	5.5	SM

시험말뚝은 압력배관용 탄소강관말뚝을 사용하였으며 말뚝 직경은 216mm, 두께는 12.7mm이며 실두께는 11.8mm이다. 탄성계수 및 포아송비는 도로교설계기준 해설(2008)에 명기된 것을 따라 탄성계수 210,000MPa 와 포아송비 0.3을 데이터 분석에 적용하였다. 변형율을 측정하기 위한 변형률계는 말뚝의 내부에 용접으로 양단에 2개씩 부착하였으며 시험을 진행함에 따라 1m 간격으로 용접을 하였으므로 변형률계도 1m간격으로 설치하였다.

재하시험은 유압잭의 압입력(P)과 동등이상 중량(W)의 콘크리트 기초가 필요($W \geq P$)하기 때문에 약 1.7m 깊이까지 콘크리트 기초를 타설하고 양생기간을 거친 후에 진행하였다. 재하시험 방법은 일반적으로 완속재하법(slow test)과 급속재하법(quick loading test)이 이용되는데 완속재하법은 하중단계의 지속시간이 제 각각이므로, 재하실험 결과 및 분석의 신뢰성이 떨어지고 최대하중까지 총 하중단계수가 8 단계 정도이므로 말뚝 두부의 하중-침하량 곡선 등의 형태가 부드럽지 않아 결과분석이 용이하지 않을 수 있다(Fellenius, 1990). 이에 반하여 급속 재하법은 최대하중까지의 하중단계수가 최소 20단계 이상이므로 그러한 문제점을 극복할 수 있다.(김성렬, 2006)

그러므로 본 연구에서는 ASTM 1143-81(ASTM, 1981)에서 채택하고 있는 급속재하법을 적용하였다. 재하시험은 말뚝 1본에 대하여 3.5m부터 말뚝을 1m씩 관입할 때마다 수행하여 총 8회의 급속재하시험을 수행하였으며, 반복재하시험은 수행하지 않았다. 재하하중은 설계하중의 10~15%로 적용하고 재하간격을 2.5분으로 하였으며, 각각의 하중단계마다 20초 간격으로 침하량을 기록하였다. 표 2에 재하시험에 따른 지반조건을 정리하였다.

표 2. 재하시험 수행조건

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
심도(m)	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
선단조건	풍화토	풍화토	풍화토	풍화토	풍화토	풍화토	풍화암	풍화암
SPT N값	32/30	36/30	40/30	50/16	50/15	50/8	50/10	50/10

또한 유압잭으로부터 얻은 재하 하중값은 로드셀을 이용하여 정확하게 측정한 값과 차이가 있으므로 본 시험에서는 말뚝두부에 로드셀을 설치하여 재하하중을 정확히 측정하였다.

3. 재하시험 결과 분석

총 8회의 재하시험 결과로부터 말뚝두부 하중-변위 곡선, 심도별 축변형률 분포 곡선 등이 얻어졌으며, 이를 이용하여 심도별 축하중 분포곡선과 단위 주면 마찰력 곡선 등을 산정하였다.

3.1 말뚝두부의 축방향 하중-변위 곡선

그림 3은 말뚝두부에서 얻어진 축방향 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 시험별 재하하중의 최대값은 표 3에 표시하였다. 심도가 깊어질수록 지반에서 주면마찰력과 선단지지력이 크게 발휘되어 최대압입하중이 증가하였으며 초기접선탄성계수를 이용하여 분석한 결과 깊이 5.5m 까지 말뚝이 길이증가로 지반의 강성이 증가하였지만 5.5m 이후로는 강성이 거의 일정하였다.

또한 Test 5와 Test 6은 하중-변위 곡선이 비슷한 형태를 보였다. 이것은 Test 6이 수행된 심도(8.5m)가 풍화토층과 풍화암층의 경계에서 수행되었기 때문이며 시료사진을 통해 8m에서부터 단단한 암편이 다량 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

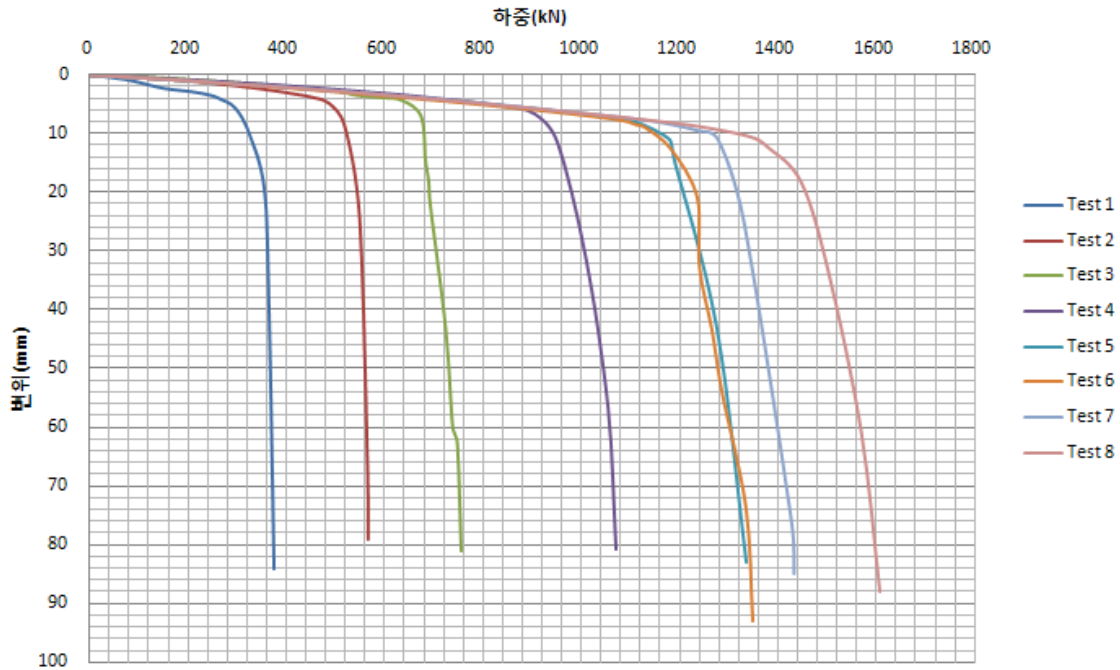


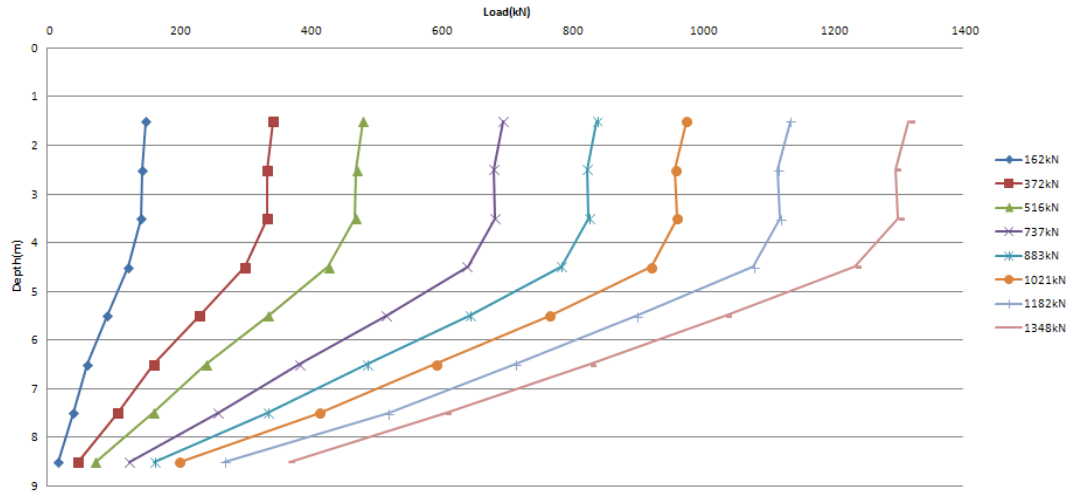
그림 3. 축방향 하중-변위 곡선

표 3. 재하시험별 로드셀에 의한 최대 압입하중

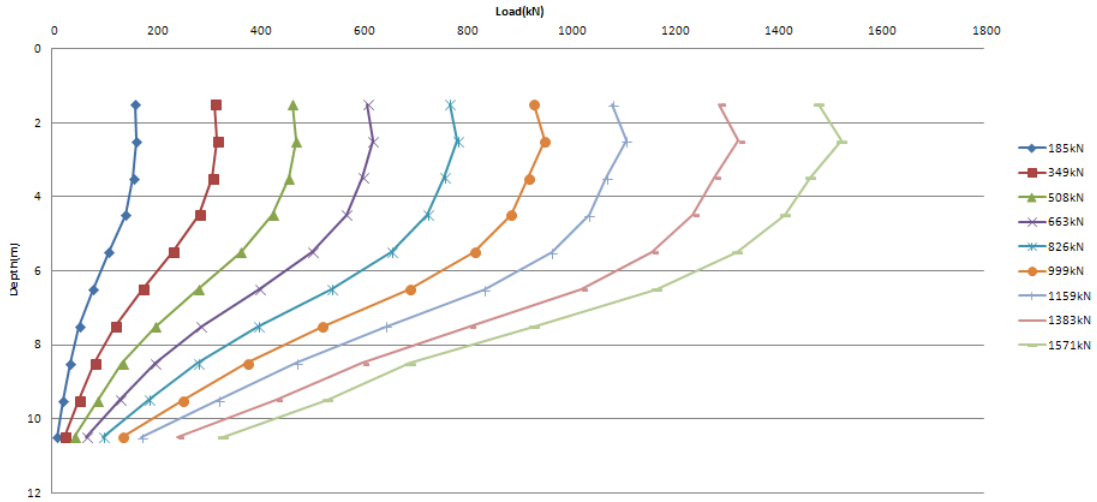
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
최대압입하중(kN)	341	598	728	1030	1305	1344	1462	1628

3.2 축하중 분포 곡선

그림 4는 Test 6과 Test 8의 축하중 분포 곡선을 보여준다. 축하중을 계산하기 위한 변형률은 양단에 부착한 변형률계의 평균값을 사용하였으며 게이지 팩터와 재하시험 수행시의 온도를 고려하여 변형률을 보정한 값을 이용하였다. 또한 말뚝의 단면적은 말뚝의 실두께를 고려하고 변형률계를 용접한 부분을 제외한 순단면적을 이용하고 포아송비는 0.3을 적용하여 심도별 축하중을 산정하였다.



(a) Test 6



(b) Test 8

그림 4. 재하시험별 축하중 분포 곡선

3.3 압입강관말뚝의 허용지지력 산정

재하시험을 이용한 허용지지력을 산정하는 위해 다양한 방법으로 허용지지력을 산정하였다. 하중-침하량 곡선에서 말뚝직경의 10%에 도달하면 이를 극한지지력 보는 Hansen(1963)의 방법은 극한지지력이 분명하게 규명되기 때문에 허용지지력은 극한하중을 안전율 3.0으로 나눈 값이다. DIN 4026(1975)에 의하면 말뚝 직경의 2.5%에 해당하는 순침하량에 도달하였을 때의 하중을 극한하중으로 하고 여기에 안전율을 2.0을 적용하여 허용지지력을 결정한다. Davisson(1973)의 판정법은 순침하량의 측정 없이 말뚝과 지반의 탄·소성 거동을 판정할 수 있는 해석법으로 직경 600mm 미만 말뚝의 경우, 말뚝의 탄성 압축량에 $x(x=3.81+D/120\text{mm})$ 을 더한 값을 말뚝의 극한지지력으로 정의하였고 여기에 안전율 2.0을 적용하여 허용지지력을 산정하는 방법이다. ASCE 20-96(ASCE, 1997)은 Davisson방법을 수정하여 x 에서 직경 600mm 미만 말뚝의 경우 말뚝의 직경을 100으로 나누는 방법이며 급속재하시험 결과에 대하여 주로 적용된다. 급속재하시험결과는 ASCE 20-96(1997)방법을 이용하여 가장 많이 허용지지력을 산정한다.(국토해양부, 2008). 또한 국내 뿐만 아니라 최근 서구에서도 가장 합리적인 말뚝의 허용지지력 판정법으로 인정받고 있다. 따라서 본 연구에서는 압입강관말뚝의 허용지지력 ASCE 20-96(1997)방법으로 산정할 것이다. 표 4는 위의 방법을 이용하여 재하시험결과의 허용지지력을 산정한 것이다.

표 4. 재하시험결과를 이용한 허용지지력 산정

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
Hansen(kN)	118	182	231	319	419	412	443	494
DIN 4026(kN)	152	254	334	425	434	435	442	450
ASCE 20-96(kN)	150	260	338	461	579	588	647	706

3.3.1 허용주면마찰력 & 허용선단지지력 산정

재하시험결과에서 시험에 따른 심도별 주면마찰력을 산정하기 위하여 단위주면마찰력-변위(f-w)곡선을 산정하였다. O'Neil 등(1999)의 연구에 따르면 말뚝직경의 1%에 해당하는 변위가 발생할 때의 주면마찰력을 극한지지력으로 결정한다. 따라서 본 연구에서는 산정한 f-w곡선을 바탕으로 말뚝직경의 1%에 해당하는 변위가 발생하였을 때의 주면마찰력을 단위주면마찰력으로 산정하였으며, 그림 5는 Test 8에 대한 f-w을 곡선을 나타낸다.

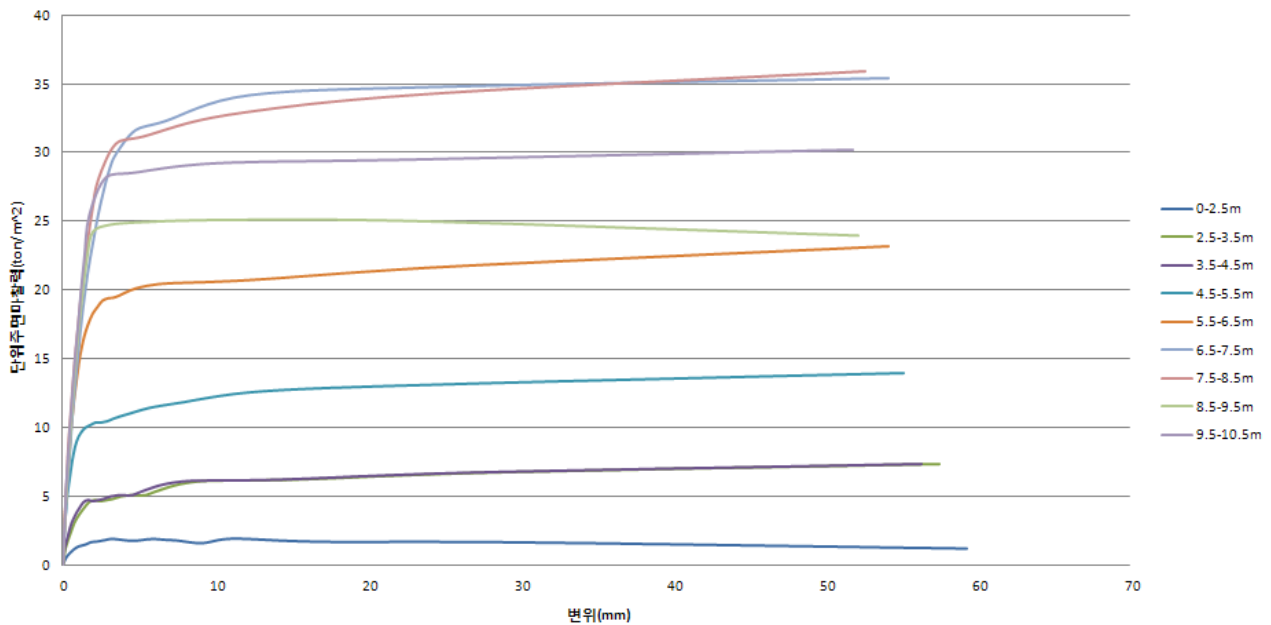


그림 5. Test 8의 f-w곡선

압입강관말뚝의 허용선단지지력은 표 4에서 제시한 ASCE 20-96에서 제시한 전체허용지지력에서 4.1에서 구한 허용주면지지력을 뺀 값으로 산정하였으며, 표 5는 압입강관말뚝의 허용주면마찰력과 허용선단지지력을 나타낸 것이다.

표 5. 압입강관말뚝의 허용지지력 산정

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
허용주면마찰력(kN)	36	106	215	313	339	397	476	484
허용선단지지력(kN)	114	154	123	148	240	191	171	222
허용지지력(kN)	150	260	338	461	579	588	647	706

4. 국내설계기준에 의한 압입강관말뚝의 허용지지력 산정

4.1 N값의 최대치를 50으로 제한시킨 경우

재하시험을 분석하여 허용지지력을 산정한 결과를 국내설계기준과 비교하기 위하여 국내설계기준에 의한 압입강관말뚝의 허용지지력을 산정하였다.

구조물 기초 설계기준(2009)에서 표준관입시험(SPT)결과를 이용하여 사질토 지반에 설치된 항타말뚝의 지지력을 산정하기 위해 Meyerhof(1976)이 제안한 식 (1), (2), (3)을 사용하였다.

$$Q_u = mN'_{60}A_p + n\overline{N}_{60}A_s \quad (1)$$

$$N'_{60} = C_N \cdot 60 \quad (2)$$

$$C_N = 0.77 \log \left(\frac{20}{0.0105\sigma'_v} \right) \quad (3)$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력(kN)

A_p : 말뚝선단면적(m^2)

A_s : 사질토지반에 묻힌 말뚝의 겉면적(m^2)

n: 2, $n\overline{N}_{60} \leq 100kPa$

N_{60} : 말뚝선단부 부근의 N값

\overline{N}_{60} : 말뚝주면부 사질토지반의 평균 N값

σ'_v : 말뚝이 근입된 지반의 유효상재하중(kPa)

위의 방법을 이용하여 산정한 허용지지력을 표 6에 제시하였다. 이 값은 ASCE 20-96에서 제시한 허용지지력 값과 7~46% 정도의 오차율이 있었으며 이는 구조물 기초 설계기준에 의해 산정한 허용지지력이 압입강관말뚝의 허용지지력을 과소평가함을 의미한다.

표 6. 구조물 기초 설계기준 해설에 의한 항타 말뚝의 허용지지력 산정

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
허용주면마찰력(kN)	44	63	83	106	130	154	178	201
허용선단지지력(kN)	117	132	146	168	183	183	183	183
허용지지력(kN)	161	195	229	274	313	337	361	384

매입말뚝의 지지력 산정에서 사질토의 경우 식(1)의 단위면적당 극한 선단지지력을 $200N(\leq 12,000)$ 으로, 단위면적당 극한주면마찰력을 $2.5N(N \leq 50)$ 으로 허용지지력을 산정하였다. 표 7은 구조물 기초설계기준 해설에 의한 매입 말뚝의 허용지지력 산정에 대한 값이다. 항타말뚝과 마찬가지로 매입말뚝의 허용지지력 산정에서도 압입강관말뚝의 허용지지력을 과소평가하는 문제가 있었다.

표 7. 구조물 기초 설계기준 해설에 의한 매입 말뚝의 허용지지력 산정

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
허용주면마찰력(kN)	55	79	104	132	163	193	222	251
허용선단지지력(kN)	78	88	98	112	146	146	146	146
허용지지력(kN)	133	166	201	244	309	339	368	398

도로교 설계기준(2012)에서 표준관입시험을 이용하여 사질토 지반에 설치된 말뚝의 지지력을 산정하기 위해 식 (4), (5), (6)을 사용하였다. 이 때 극한한계상태 대한 저항계수는 0.3을 적용하였다.

$$q_u = \frac{0.038N_{corr}D_b}{D} \leq q_t \quad (4)$$

$$N_{corr} = \left[0.77 \log_{10} \left(\frac{1.92}{\sigma'_v} \right) \right] N \quad (5)$$

$$q_s = 0.0019 \bar{N} \quad (6)$$

여기서, N_{corr} : 상재응력 σ'_v 에 대하여 수정한 말뚝 선단근처의 대표적인 SPT 타격횟수(타/300mm)

N: SPT 타격횟수(타/300mm)

D: 말뚝의 폭 또는 직경(mm)

D_b : 지지층에 관입된 말뚝길이(mm)

q_t : 한계 선단지지력으로 사질토인 경우 $0.4N_{corr}$

\bar{N} : 말뚝 주변을 따라 얻은 보정하지 않은 평균 SPT 타격횟수(타/300mm)

위의 방법을 이용하여 재하시험결과를 이용한 허용지지력을 산정한 결과는 표 8에 제시하였다. 이 값은 ASCE 20-96에서 제시한 허용지지력 값과 18~45% 정도의 오차율이 있었으며 이는 구조물 기초 설계기준 해설과 마찬가지로 도로교 설계기준에 의한 허용지지력 산정이 압입강관말뚝의 허용지지력을 과소평가하는 문제가 있었다. 매입말뚝의 경우 표 5에서 산정한 구조물 기초 해설에 의한 허용지지력 산정 값과 같다.

표 8. 도로교설계기준 해설에 의한 허용지지력 산정

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
허용주면마찰력(kN)	38	54	71	90	111	132	152	172
허용선단지지력(kN)	140	158	176	202	220	220	220	220
허용지지력(kN)	160	192	225	269	306	325	344	364

N값의 최대치를 두는 경우 허용선단지지력에서 모두 Test 5에서 이후로 같은 값이 산정되기 때문에 제대로 된 허용선단지지력을 산정할 수 없었으며 허용주면마찰력의 경우도 SPT N값이 작게 평가되기 때문에 N값에 최대치를 두면 결국 허용지지력을 과소평가하는 문제가 발생하였다.

4.2 N값을 선형적으로 증가시킨 경우

4.1에서 국내설계기준에 의한 허용지지력 산정에서 SPT N값에 최대치를 둘 경우 허용지지력을 과소평가 하기 때문에 N값을 선형적으로 증가시켜 허용지지력을 산정하였다. N값이 50/15일 경우 100/30으로 산정하는 방식을 적용하였다. 표 9는 국내설계기준에 의한 허용지지력 산정 값을 나타낸다.

표 9. SPT N값을 선형적으로 증가시킨 허용지지력 산정 값

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
보정 후 N값	32/30	36/30	40/30	68/30	100/30	147/30	169/30	150/30
ASCE 20-96(kN)	150	260	338	461	579	588	647	706
구조물기초설계기준 (항타말뚝)(kN)	161	195	229	368	540	789	955	960
도로교설계기준 (항타말뚝)(kN)	178	212	246	400	589	861	1029	1010
매입말뚝(kN)	133	166	201	315	461	672	833	880

N값을 선형적으로 증가시킨 경우 국내설계기준에 의한 허용지지력 값이 Test 5 이후 실제 압입강관 말뚝의 허용지지력보다 과대평가하는 것을 나타낸다. 또한 이 값은 주변마찰력의 증가폭은 작지만 선단 지지력을 매우 크게 산정하기 때문에 N값을 선형적으로 증가시켜서 허용지지력을 산정하는 데는 문제가 있음을 알 수 있었다.

4.3 층을 나누어 허용지지력을 산정한 경우

지반조사 결과 심도 8.8m에서 풍화암층이 발견되었다. 그러나 SPT N값의 경우 Test 5가 수행된 심도 7.5m에서 50/15으로 측정되었기 때문에 풍화토의 N값의 범위를 벗어나기 때문에 Test 5~Test 8의 경우는 암반에 근입된 말뚝의 지지력 공식인 식(7)을 적용하여 허용지지력을 산정하였다. 이 때 q_u 는 지반조사에서 측정되지 않았기 때문에 구조물 기초 설계 기준(2009)에서 제시하고 있는 암편내압강도의 평균값인 $50kg/cm^2$ 을 적용하였다. 식(7)은 강관말뚝이 암반에 말뚝직경 정도 근입되는 조건이 만족되는 경우에 사용할 수 있으며, 계산된 극한선단지지력은 암반근입부의 주변마찰력까지를 포함한 값이다. 표 10은 식(7)을 이용하여 허용지지력을 산정한 값을 나타낸다.

$$P_u = 140q_u^{1/2} \cdot A_t^{2/5} \cdot A_i^{1/3} \quad (7)$$

여기서, P_u : 강관말뚝의 극한선단지지력(t)

q_u : 암반의 일축압축강도(tf/m^2)($q_u \leq 1000tf/m^2$)

A_t : 강관말뚝의 선단부 순단면적(m^2)

A_i : 강관말뚝의 선단심부면적(m^2)

표 10. 풍화토층과 풍화암층으로 구분하여 허용지지력을 산정한 값

	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
허용지지력(kN)	578	602	626	649

풍화토층과 풍화암층으로 구분하여 허용지지력을 산정한 경우 오차율이 10%이내로 산정되어 비교적 재하시험결과와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 밝혀졌다.

4.4 압입강관말뚝의 허용지지력 산정식 제안

압입강관말뚝의 허용지지력을 산정하기 위한 방법으로 4.3에서 제시한 풍화토층과 풍화암층의 구분은 비교적 재하시험결과와 허용지지력을 산정한 결과와 유사한 값을 보였다. 풍화암층인 Test 1~Test 4의 경우 N값을 선형적으로 증가시켜서 주변마찰력과 선단지지력을 산정할 경우 허용지지력을 과소평가하긴 하지만 국내설계기준에 의한 값보다는 과소평가하며 풍화암층의 경우는 오차율 10%이내로 재하시험결과와 근사한 값을 보였다. 따라서 압입강관말뚝의 허용지지력을 산정하기 위해서는 층을 구분하여 허용지지력을 산정할 것을 제안한다.

5. 결 론

본 연구에서는 압입강관말뚝의 허용지지력 산정식을 제안하기 위하여 재하시험결과를 바탕으로 허용 주변마찰력과 허용선단지지력을 산정하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 재하시험 결과로부터 총 3가지 방법에 대한 허용지지력을 산정한 결과, ASCE 20-96방법이 가장 허용지지력을 크게 평가하였으며 급속재하시험방법에 가장 알맞은 허용지지력 결과를 나타내었다.
- (2) 국내설계기준에 의한 허용지지력을 산정한 결과 압입강관말뚝의 허용지지력을 7-50% 과소평가하였다.
- (3) 압입강관말뚝의 허용지지력 산정식을 제안하기 위해 다양한 분석을 수행한 결과 풍화토층과 풍화암층을 구분하여 허용지지력을 산정하는 것이 오차율이 가장 작게 나타났으며 이때 풍화암층에서는 N 값을 선형적으로 증가시켜 분석한 값이 재하시험결과와 잘 맞는 경향을 보였다.

참고문헌

1. 국토해양부 (2008), LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구, 제2절.
2. 국토해양부 (2012), 도로교 설계기준(한계상태설계법), 제7장.
3. 김성렬, 정성교, N. T. Dzung (2006), "PHC 말뚝의 하중전이실험을 통한 참 지지력의 산정". 한국지반공학회 논문집 제 22권 11호 pp. 113-122분석", 한국지반공학회 논문집 제 26권 11호 pp. 111-123.
5. 한국지반공학회 (2009), 구조물 기초 설계 기준 해설, 제5장.
6. ASCE (1997), Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations, ASCE 20-96, ASCE
7. ASTM D 1143-81 (1981), "Standard test method for piles under static axial compressive load", American Society for Testing and Materials.
8. Davisson, M.T. (1973), "High Capacity Piles." Department of Civil Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois
9. DIN 4026 (1975), Driven piles : construction procedure and permissible loads.
10. Fellenius, B. H. (1990), Guidelines for the Interpretation and Analysis of the Static Loading Test, Deep Foundations Institute , pp. 4-7.
11. Hansen, B. J. (1963), "Discussion, Hyperbolic Stress-strain Response, Cohesive Soils," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol.89, SM No.4, pp. 241-242.
12. O'neil, M. W., Reese, L. C. (1999), Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. Publication No. FHWA-IF-99-025, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.