

침하량과 압축량을 고려한 말뚝의 설계법 개발을 위한 연구 A Study for the Development of Pile Design Method Considering Settlement and Compression

임종석¹⁾, Jong-Seok Lim, 하혁²⁾, Hyuk Ha, 정상균²⁾, Sang-Kyun Jung

¹⁾ 목포대학교 건설공학부 토목공학전공 교수, Professor, Major in Civil Engineering, Division of Construction Engineering, Mokpo National University

²⁾ 목포대학교 건설공학부 토목공학전공 석사과정, Graduate Student, Major in Civil Engineering, Division of Construction Engineering, Mokpo National University

SYNOPSIS : A pile is compressed with settlements when loading and bearing capacity is altered along relative displacement of pile/soil on settlement and compression. Settlements of pile displaying limit skin friction is different from displaying tip resistance. Therefore, it is an error in traditional method that bearing capacity of pile is estimated from the sum of limit skin fraction and tip resistance. Accordingly, development of design method considering behavior of load-settlement is needed.

In this study, we would like to establish the base for development of design method considering bearing capacity altering along displacement on settlement and compression. For this, we established system and substance of design method. And in order to establish relationship of load-settlement of pile on the type of soil, we analyzed and arranged existing database and pile loading test.

On design method, settlement is assumed gradually on each capacity level being assumed gradually. Bearing capacity developing on the pile is obtained on each settlement level. Until the obtained bearing capacity will be equal to assumed capacity, this process is continued with increasing settlement. Load-settlement curve for soil classification is sketched in the process computing settlement on assumed capacity. This design method will be materialized by computation program.

Key words : Load-settlement curve, Load transfer, Pile loading test, Computation program

1. 서 론

말뚝은 하중을 받으면 침하와 동시에 압축하며 침하와 압축에 따른 흙과 말뚝의 상대적인 변위에 따라 발생하는 지지력이 달라진다. 이러한 말뚝 기초의 설계시 말뚝의 거동은 예측하기 매우 어렵다. 그리고 극한주면마찰력을 발휘하는 말뚝의 침하량과 극한선단지지력을 발휘하는 침하량은 크게 달라 극한주면마찰력과 극한선단지지력의 합으로부터 말뚝의 지지력을 추정하는 전통적인 설계방법에는 오류가 있다. 따라서 하중-침하 거동을 고려한 설계방법의 개발이 필요하다.

말뚝의 지지력을 해석하는데 있어서 정확한 해를 제시한 설계법은 없는 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 해석에는 여러 가지 가정을 단순화하거나 많은 현장 실험들을 통해 신뢰성을 확보하는 것이 최선의 방법이다. 그러나 국내에서 실무적용 사례가 증가함에 따라 보다 합리적인 설계법이 필요한 실정이

다. 최근 컴퓨터의 발달로 인해 보다 정교하고 복잡한 해석을 수행할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 침하와 압축에 따른 변위에 따라 달라지는 지지력을 고려한 설계법의 개발을 위한 토대를 구축하고자 하였다. 이를 위하여 기존의 자료와 문헌들을 분석, 정리하고 설계법의 체계 및 내용을 수립하였다.

2. 말뚝 해석법의 종류

말뚝과 주변 흙 사이에 발생하는 마찰력은 응력-변위-시간의 특성, 말뚝-흙 시스템 내에 있는 모든 요소의 파괴 특성, 그리고 말뚝의 설치방법 등에 의해 영향을 받는다(Vesic, 1977). 일반적으로 축하중을 받는 말뚝의 해석법으로는 실험적인 방법(Experimental method), 하중전이함수 방법(Transfer function), 탄성고체법(Elastic solid approach method)와 유한요소해석법(Einite-element analysis)이 있다.

2.1 실험적 방법

가장 확실한 하중전이해석 방법으로 말뚝에 축하중 계측 장치를 부착 또는 매설하여 축하중의 분포를 각 재하 단계별로 직접 측정하는 것이다. 중심부에 수직하중 P_0 가 재하된 말뚝에서 선단지지력(Q_p)는 말뚝 선단까지 전달된 축하중을 나타내고, 주변마찰력($Q_s = P_0 - Q_p$)는 말뚝 주변마찰력의 합을 나타낸다. 그리고 말뚝의 주변장 p 로 나눈 축하중 곡선의 z 방향에 대한 기울기는 말뚝 몸체부를 따라 생기는 단위 주변마찰응력(f_0)이며, 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_0(z) = -\frac{1}{p} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \quad (1)$$

$Q(z)$ 가 깊이 z 에 따라 감소한다면, 주변마찰응력(f_0)는 양의 값을 갖는다. 만약 단면적(A)과 말뚝축의 변형계수(E_p)를 알고, 말뚝두부의 수직변위(w_0)를 안다면, 실험에서 측정된 말뚝 축하중 분포 곡선 $Q(z)$ 를 이용하여 깊이 z 에서의 말뚝 수직변위 $w(z)$ 를 식 (2)으로 구할 수 있다.

$$w(z) = w_0 - \frac{1}{A \cdot E_p} \int_0^z Q(z) dz \quad (2)$$

여기서, $f_0(z)$ 는 $w(z)$ 의 함수로 나타낼 수 있는데 이것을 마찰하중전이함수라고 한다.

말뚝하중 계측용 센서는 시공 전에 설치되어야 하며, 대구경 말뚝에 대한 정재하시험도 쉬운 일이 아니므로, 말뚝축하중을 직접 측정하지 못하는 경우에는 해석적인 방법에 의존할 수밖에 없다. 따라서 하중전이 해석은 말뚝의 연직 지지력 뿐만 아니라 말뚝의 침하량도 산정하는데 활용할 수 있으므로 그 중요성은 매우 크다고 할 수 있다.

2.2 하중전이 함수 방법

하중전이 함수 방법에서는 일반적으로 말뚝을 n 개의 요소로 분할하고, 임의의 말뚝 요소는 축하중($P_{(i)}$)과 단위마찰응력(f_i)이 작용하는 길이 ΔL 인 압축 단기둥으로 가정한다. 여기서 단위 마찰응력(f_i)는 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$f_i = \frac{-P_i + P_{i-1}}{p \cdot \Delta L} = \frac{-\Delta P_i}{p \cdot \Delta L} \quad (3)$$

단면적과 변형계수를 알 수 있다면 요소 중심의 상대 수직변위는 재료의 강도 계산식으로부터 계산할 수 있다. 하중전이 함수 방법에서는 말뚝 두부의 변위만을 안다고 가정한다.

말뚝의 축하중 P_i 는 전이함수 $f(w_i)$ 를 이용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_i = P_i - P_{i-1} = -f_{w_i} \cdot \Delta A \tag{4}$$

2.3 탄성고체법

하중전이함수 방법의 결점을 보완하기 위해 주변 흙의 마찰력으로 분산된 축하중, ΔP_i 의 영향을 고려하고, 말뚝요소의 변위 (${}_p w_i$)가 인접 흙의 변위 (${}_s w_i$)와 다를 수도 있다고 가정한다. 또한 탄성계수 (E_s)와 푸아송비(ν_s)에 의해 거동이 규정되는 균질, 탄성, 등방성을 가지는 고체인 흙을 통하여 하중 ΔP_i 를 전달할 수 있다고 가정한다. 이러한 가정들을 고려하면 전이함수식 대신에 식 (5)와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$({}_p w_p) = \frac{D}{E_s} \left(\sum_{j=1}^n I_{pj} f_i + I_{pp} q_p \right) \tag{5}$$

여기서, I_{ij} 는 하중에 의해 생긴 요소 i 의 침하에 대한 영향계수이며, 이것은 고체 내부에서 선단 하중의 영향을 받는 반 무한 고체의 변위와 응력에 대한 Mindlin해(Mindlin, 1936)를 사용하여 계산한다.

말뚝과 흙 사이에서 미끄러짐이 발생하지 않는다고 가정하면 식 (6)과 식이 구하여진다.

$${}_p w_i - {}_p w_{i-1} = \frac{\Delta P_i \Delta L}{E_p A} \tag{6}$$

미끄러짐이 발생한다면

$$\Delta P_i = P_i - P_{i-1} = -f_s \cdot p \cdot \Delta L \tag{7}$$

최근에는 컴퓨터의 급속한 발달로 인하여 수식이 복잡한 경우에도 빠르고 정확하게 문제를 해결할 수 있다.

2.4 유한요소해석법

말뚝의 축하중 분포도를 해석하기 위하여 말뚝과 주변지반을 유한요소로 분할하여 해석할 수 있다. 유한요소 해석에서는 말뚝 설치 방법에 의해 부과된 응력과 변위조건을 도입할 수 있으며, 지반내에 설치된 말뚝은 응력분포에 미치는 영향도 고려할 수 있다. 유한요소 해석에서는 지반속에 층 또는 서로 다른 특성의 지층과 렌즈(lense)와 같은 임의의 불균질도 고려할 수 있다. 그 결과는 지금까지 꽤 고무적으로 타나난다(Vesić, 1977).

3. 압축량과 침하량을 고려한 설계기법

3.1 설계법의 개요

본 연구에서는 축방향 하중을 받는 말뚝에서 발생하는 변위에 따라 발생하는 지지력을 산정하는 방법

을 제안하였다. 이 때 변위는 침하량과 압축량을 고려한 것이다. 이 설계법은 하중전이함수 방법과 유사한 방법으로 말뚝을 n 개의 요소로 분할하여 각 요소마다의 압축량을 구하여 말뚝 하부로의 변위를 차감하고 그 변위에 따른 말뚝의 단위 주면마찰력으로 재하하중을 차감하는 방법이다.

우선 단계적으로 지지력을 가정하고 그 지지력 단계에서 침하량을 가정하여 산정된 지지력이 가정한 지지력보다 작거나 클 때 침하량을 증가하거나 감소시켜 최종 침하량을 산정한다. 지지력을 점차 증가시키면서 같은 방법으로 침하량을 산정하여 하중-침하량 곡선을 작성한 후 최종적으로 극한지지력을 산정하는 방법이다.

3.2 설계법에 대한 알고리즘

말뚝은 하중을 받으면 변위가 발생하게 되는데 이 때 발생하는 변위는 침하량과 말뚝 재료 특성상 발생하는 압축량을 포함하고 있다. 말뚝을 요소 분할하여보면 말뚝의 주면에서 작용하는 주면마찰력으로 인하여 각 절편마다의 압축량이 하부로 갈수록 작아질 것이다. 그림 1은 말뚝의 해석을 위해 절편으로 분할한 것이다.

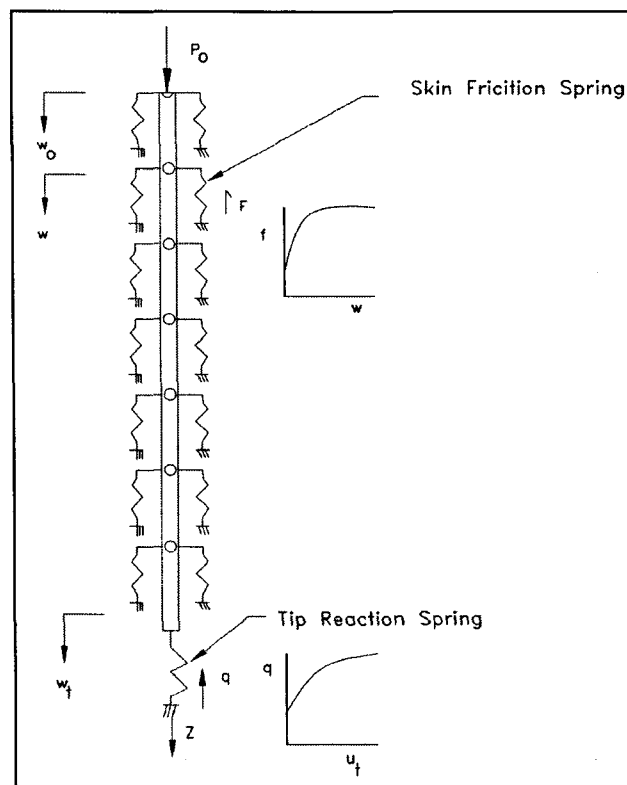


그림 1. 말뚝의 해석을 위한 모델

이러한 특성을 고려하여 설계법의 개발에 접근하고자 한다. 먼저 말뚝에 작용하는 재하하중 P_0 와 침하량 w_0 를 가정하여 앞에서 기술한 $f-w$ 곡선과 $q-w$ 곡선을 이용하여 첫 번째 절편에서 작용하는 주면마찰력을 구하여 보면 첫 번째 절편의 하부에서는 이론적으로 P_0 에서 구한 주면마찰력($\Delta Q_{s,1}$)을 뺀 값의 하중이 작용하게 된다. 힘의 평형에서 첫 번째 절편의 상부와 하부에는 두 값의 평균값으로 축력이 작용하게 된다. 말뚝의 탄성계수와 단면적, 그리고 절편의 길이를 이용하면 압축량(Δl)을 구할 수 있다. 2번째 절편에서는 상부 변위가 $w_0 - \Delta l$ 이 될 것이고 상부 하중은 $P_0 - \Delta Q_{s,1}$ 이 되고 같은 방법으로 $\Delta Q_{s,2}$ 를 구하고 압축량을 구한다. 이렇게 구한 지지력이 초기에 가정한 P_0 이하가 된다면 침하량을 증

가시켜 반복 계산을 하고, 구한 지지력과 P_0 가 같게 된다면 하중단계를 증가시키고 이때 구하여진 w_0 부터 시작하여 같은 과정을 수행한다.

각 하중단계에서의 침하량을 기록하여 하중-침하량 곡선을 그리고 이 곡선을 이용하여 극한지지력을 구하게 된다. 위의 과정에 따른 순서도를 그림 2에 도시하였다.

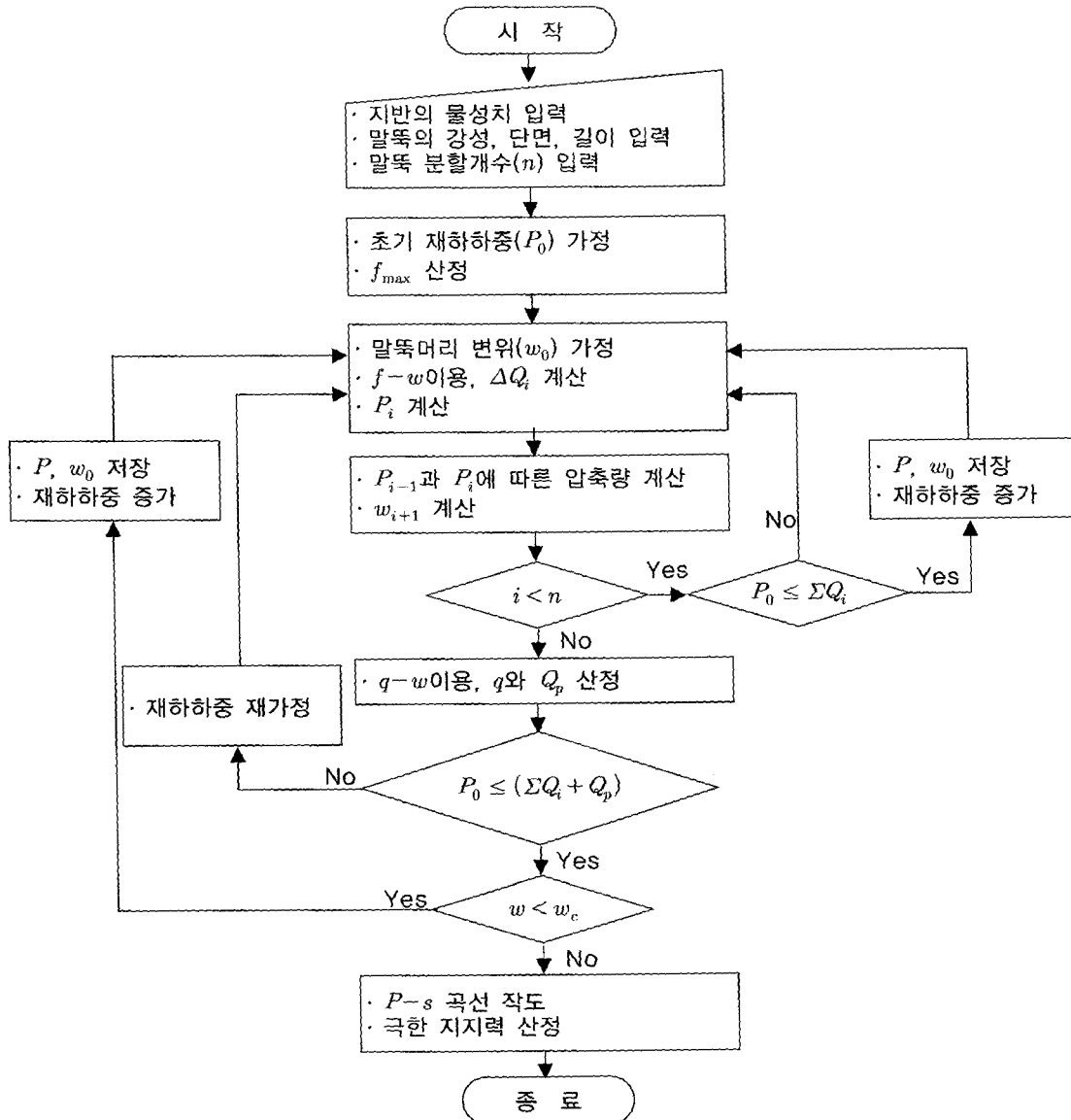


그림 2. 설계법에 대한 프로그램 순서도

4. 기존 $f-w$ 와 $q-w$ 곡선

상재하중 P_0 는 말뚝/흙 표면을 따라 전단응력으로 전달되고 말뚝 선단에서 선단지지력으로 전달된다. 이러한 체제에서의 전체변위는 단면의 구조, 토질, 말뚝의 길이, 거칠기, 지하수의 유무 등의 많은 요소들에 의해 달라진다. 기존의 연구들은 3차원 해석이 복잡하여 1차원 모델로 변환하여 수행되었다.

상재하중을 받는 말뚝의 설계법에서는 각 깊이에 따른 $f-w$ 곡선들과 선단에서의 $q-w$ 곡선들의 모델은 현장 실험들을 바탕으로 여러 가지 형태로 제안되었다.

표 3에서는 기존에 제안된 $f-w$ 곡선을, 표 4에서는 $q-w$ 곡선을 분류하여 나타내었다.

표 1. 기존에 제안된 $f-w$ 곡선

지반 종류	저 자	$f-w$ 곡선의 제안식 또는 방법	비 고
사질토	Mosher (1984)	$f = \frac{w}{\frac{1}{k_f} + \frac{w}{f_{max}}}$	· 향타 강관말뚝 실험결과 이용
	Kraft, Ray and Kagawa(1981)	$w = \frac{f_{max} R}{G} \left[\ln \left[\frac{\frac{2L\rho(1-\nu)}{R} - R_f}{1 - R_f} \right] - \ln \left[\frac{\frac{2L\rho(1-\nu)}{R} - \frac{f_{resid} R_f}{f_{max}}}{1 - \frac{f_{resid} R_f}{f_{max}}} \right] \right]$	· 직접전단시험 곡선 이용
	Vijayvergiya(1977)	$\frac{f}{f_{max}} = 2 \sqrt{\frac{w}{w_c} - \frac{w}{w_c}}$	
	Coyle and Sulaiman (1967)	깊이에 따른 두 개의 곡선 표현	· 실내실험과 현장시험 연관
	Briaud and Tucker (1984)	$f = \frac{W}{\frac{1}{k_f} + \frac{w}{f_{max} - f_r}} - f_v$	· 현장실험 이용 · 잔류응력 고려
점성토	Coyle and Reese (1966)	깊이에 따른 세 개의 곡선 표현	
	Aschenbrener and Olson (1984)	현장재하시험에 의한 곡선 표현	· 현장실험 이용
	Kraft, Ray, and Kagawa (1981)	사질토와 동일하나 전단계수 산정방법 제시	
	Heydinger and O'Neill (1986)	$\frac{f}{f_{max}} = \frac{\frac{E_f}{f_{max}} \frac{w}{2R}}{\left[1 + \left(\frac{E_f}{f_{max}} \frac{w}{2R} \right)^m \right]^{1/m}}$	· 유한요소해석
	Vijayvergiya(1977)	사질토와 동일한 방법 사용 (다양한 w_c 제공)	

표 2. 기존에 제안된 $q-w$ 곡선

지반 종류	저 자	$q-w$ 곡선의 제안식 또는 방법	비 고
사질토	Mosher (1984)	$q/q_{max} (4w)^{1/n}$	
	Kraft, Ray and Kagawa(1981)	$w = \frac{2Rq(1-\nu^2)}{E} I_t$	· 탄성해법
	Vijayvergiya(1977)	$\frac{q}{q_{max}} = \left(\frac{w}{w_c} \right)^{1/3}$	
	Briaud and Tucker (1984)	$q = \frac{w}{\frac{1}{k_q} + \frac{w}{q_{max} - q_r}} + q_r$	· 현장실험 이용 · 잔류응력 고려
	Coyle and Castello (1981)	그래프로 제시	
점성토	Aschenbrener and Olson (1984)	선단부의 직경에 따라 다르게 제시	
	Vijayvergiya(1977)	사질토와 동일한 방법 사용	

사질토의 $f-w$ 곡선의 제안에서 Mosher (1984)는 향타 강관말뚝의 시험결과를 분석하여 관계식을 제안하였고, Kraft, Ray and Kagawa(1981)는 균질하고 탄성체라는 가정하에 직접전단시험곡선을 이용하였으며, Vijayvergiya(1977)는 범용적인 사용을 위하여 f_{max} 의 값을 균질하고 중간밀도에서는 1 tsf, 실트질 모래에서는 0.85 tsf, 모래질 실트에서는 0.7 tsf, 실트에서는 0.5 tsf를 사용하도록 주어졌다. Coyle and Sulaiman (1967)는 모형실험과 현장실험을 관련시켜 20ft기준으로 상부와 하부에 적용할 수 있는

2개의 곡선을 제시하였으며 Briaud and Tucker (1984)는 다른 제안들과는 달리 말뚝 설치방법에 따라 나타나는 잔류응력을 고려한 $f-w$ 곡선을 현장실험을 통하여 제공하였다.

점성토의 $f-w$ 곡선의 제안에서는 Coyle and Reese (1966)가 깊이의 세 분류에 따라 세 개의 곡선을 제공하였고, Aschenbrenner and Olson (1984)는 비례상수 α 에 따른 f_{max} 를 적용하여 다수의 현장실험을 통하여 곡선을 제공하였다. Kraft, Ray, and Kagawa (1981)의 방법은 사질토에서 사용한 방법에서 전단계수의 산출 방법을 진동실험이나 공진주시험 등으로 구할 수 있다고 제안하고 있다. Heydinger and O'Neill (1986)는 흙의 조건을 비압밀-비배수 조건으로 가정하여 유한요소해석과 유한차분해석을 사용하여 표현하였고, 사질토에서 제안된 Vijayvergiya(1977)의 방법이 점성토에서도 사용할 수 있다.

사질토의 $q-w$ 곡선의 제안에서 Mosher (1984)는 관계식에 지수($1/n$)를 도입하여 밀도에 따라 2~4의 범위를 갖는 n 값을 제시하였고, Kraft, Ray and Kagawa (1981)는 탄성해법을 사용하여 말뚝의 장단에 따라 0.5~0.78의 범위를 갖는 계수 I_t 를 도입하여 관계식을 제안하였다. Vijayvergiya(1977) 임계 선단 변위를 선단부 반지름의 3~9%의 범위로 제시하여 관계식을 제안하였고, Briaud and Tucker (1984)는 잔류응력을 고려한 쌍곡선을 제시하였고, Coyle and Castello (1981)는 또한 상대깊이의 함수로서 f_{max} 를 제공하여 곡선을 제공하였다.

점성토에서의 $q-w$ 곡선의 제안에서 Aschenbrenner and Olson (1984)는 말뚝의 변위가 선단부 직경의 1%일때 q_{max} 에 도달한다고 제안하였고, q_{max} 의 값을 비배수 전단강도(s_u)와 지지력계수(N_c)를 도입하였다. 여기서 N_c 의 값은 0~20의 범위로 하였으나 관습적으로 9의 값을 사용하도록 제안하였다. Vijayvergiya(1977)는 마찬가지로 사질토의 $q-w$ 곡선을 사용하도록 제안하였다.

5. 결론 및 향후 연구과제

다수의 기존 연구들이 있으나 이러한 방법들의 분류방법이 너무 포괄적으로 적용되고 있는 실정이다. 보다 정확한 침하량과 압축량을 고려한 설계기법의 개발을 위해서는 많은 현장 실험 결과를 바탕으로 토질분류별로 $f-w$ 곡선, $q-w$ 곡선을 확보해야 할 것이다.

국내에서 풍화대에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이 설계법에의 적용성을 고려하여 풍화대에서의 주변마찰력과 선단지지력을 예측할 수 있는 설계법의 개발이 시급하다.

향후 현장실험에의 적용을 통하여 그 값을 비교 분석하여 설계법을 개발하고 개발된 설계법을 프로그램화하여 보다 정확하게 지지력을 예측할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. Aschenbrenner, T. B. and Olson, R. E. (1984), "Prediction of settlement of single piles in clay.", *Analysis and design of pile foundations*, American Society of Civil Engineers, J. R. Meyer, ed.
2. Briaud, J. L. and Tucker, L. (1984), "Piles in sand: A method including residual stresses.", *Journal of Geotechnical Engineering*, Proceedings Paper 19262, American Society of Civil Engineers, Vol. 110(11).
3. Coyle, H. M. and Castello, R. R. (1981), "New design correlations for piles in sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Proceedings Paper 16379, American Society of Civil Engineers, Vol. 107(GT7).
4. Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966), "Load transfer for axially loaded piles in clay", *Journal Soil Mechanics and Foundations Division*, Proceedings Paper 4702, American Society of Civil Engineers, Vol. 93(SM6).
5. Coyle, H. M. and Salaiman, I. H. (1967), "Skin friction for steel piles in sand", *Journal Soil Mechanics and Foundations Division*, Proceedings Paper 5590, American Society of Civil

Engineers, Vol. 93(SM6).

6. Heydinger, A. G. (1986), "Analysis of axial pile-soil interaction in clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10(4), pp.367~381.
7. Kraft, L. M., Ray, R. P. and Kagawa, T. (1981), "Theoretical t-z curves", *Journal Geotechnical Engineering Division*, Proceedings Paper 16653, American Society of Civil Engineers, Vol. 107(GT11).
8. Mindlin, R. D. (1936), "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid", *Physics* 7, pp.195~202.
9. Mosher, R. L. (1984), "Load transfer criteria for numerical analysis of axially loaded piles in sand; Part 1: Load transfer criteria", Technical Report K-84-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
10. Vesić, A. S. (1977), "Design of Pile Foundations", *Synthesis of Highway Practice* 42, Transportation Research Board.
11. Vijayvergiya, V. N. (1977), "Load-movement characteristics of piles", *Proceedings, Ports* 77, American Society of Civil Engineers, Vol. II, pp.269~286.