

## 타입 강관말뚝 하중전이곡선 도출을 위한 현장재하시험 연구

### A Study of Field Loading Tests for Derivation of Load Transfer Curves of the Driven Steel Pipe Piles

임종석<sup>1)</sup>, Jong-Seok Lim, 최용규<sup>2)</sup>, Yong-Kyu Choi, 심종선<sup>3)</sup>, Jong-Sun Sim, 박종희<sup>3)</sup>, Jong-Hee Park

<sup>1)</sup> 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 교수, Prof., Major in Civil Eng., Division of Construction Eng., Collage of Eng., Mokpo National Univ.

<sup>2)</sup> 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungseung Univ.

<sup>3)</sup> 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 석사과정, Graduate Student, Major in Civil Eng., Division of Construction Eng., Collage of Eng., Mokpo National Univ.

**SYNOPSIS** : As computation technologies has developed, the analysis using load transfer is mainly performed. But most of the functions used in the above program has been developed in foreign countries. Also in our nation, lots of studies concerning load transfer are being researched.

The investigation of suitability about the piles installed in our grounds, however, is required as functions acquired experientially, basing on the piles installed in foreign grounds.

In this background, the load transfer curve required to use load transfer method on its design through the analysis of field tests inside our nation intends to be made, on which this research focuses.

**Key words** : steel pipe pile, load transfer function, side friction, end bearing capacity, load transfer curve

## 1. 서론

하중전이함수법은 말뚝과 지반의 상대변위에서 결정된 주면마찰저항과 선단저항을 이용해서 단일말뚝의 하중~침하 관계를 해석적으로 구하는 방법이다 (Coyle and Reese, 1966 ; 土質工學會, 1985). 구체적으로는 말뚝본체를 탄성체로 가정하고 몇 개의 말뚝요소로 분할해서 각 말뚝요소에 지반의 마찰스프링과 선단스프링을 붙인 해석모델을 고려한다. 지반의 마찰스프링과 선단스프링에는 보통 말뚝본체의 압축변형량을 포함한 각 말뚝요소에 대한 침하량과 주면마찰저항 및 선단저항과의 관계 즉, 하중전이곡선이 이용된다. 이것들의 지반 스프링을 재하시험 등에 근거해 적절히 설정하여, 극한상태에 이르기까지 단일말뚝의 하중~침하 관계를 실상에 가깝게 표현할 수 있다.

주면마찰저항과 침하량의 관계는 유사한 지반 및 말뚝의 조건에 대한 과거의 재하시험결과를 근거해서 설정하는 것이 기본이다. 각 토층의 극한주면마찰응력값은 기존의 연직지지력 평가법에 의해 설정한다. 극한주면마찰응력에 도달할 때의 말뚝 침하량은 토질성상이나 말뚝종류, 말뚝의 시공법 등의 영향을 받는데, 분명하지는 않으며 또한 말뚝지름의 영향도 불명확하다. 주면마찰응력 - 침하량 관계는 과거의 재하시험 결과를 토대로 경험적으로 설정되어 있으며 지반의 변형계수와와의 관계는 분명하지 않다. 이와 관련하여 주면마찰에 관한 지반반력계수를 말뚝주변의 흙의 전단탄성계수와 관련지은 주면마찰응력 - 침하량 관계식이 제안되어있으며 이 사고방식이 발전해 미소변형률의 흙의 전단탄성계수를 이용해서 초기의 지반반력계수를 평가하고 흙의 응력 - 변형률 관계의 비선형성을 쌍곡선으로 표현한 경우의 주면마찰

응력과 침하량의 관계식도 제안되어 있다 (Kraft et al. 1981; 地盤工學會, 2000). 따라서 지반조사결과로부터 지반의 변형계수를 구하고 이 방법을 이용해서 각 토층의 주면마찰응력 - 침하량 관계를 설정할 수 있다.

선단저항과 침하량의 관계는 선단지지층이 사질토, 점성토 어느 경우에도 과거의 재하시험결과를 참조하는 등 적절한 하중 - 침하 관계를 설정하는 것이 기본이다.

## 2. 문헌연구

### 2.1 최대주면마찰력 및 극한선단지지력

지시말뚝은 일반적으로 선단지지력과 주면마찰력에 의해 상부하중을 지지하며, 지반이 연약지반일 때는 주면마찰력이 하향으로 작용하는데, 이 때의 마찰력을 주면마찰력이라 한다. 본 연구에서 최대주면마찰력은 국외 공학자들의 많은 방법 중 사질토에서는 Meyerhof(1976), Briaud et al.(1985)의 방법을, 점토층에서는 정역학지지력공식, 일본도로교시방서방법, Briaud et al.방법을 사용하였으며, 극한선단지지력은 Meyerhof방법, Briaud et al.방법등 표준관입값( $N$ )을 이용하여 구할 수 있는 방법들을 채택하여 사용하였다.

### 2.2 주면 · 선단하중전이곡선

#### 2.2.1 사질토에서의 주면하중전이곡선

(1) Reese and O'Neill (1989)

1988년 Reese and O'Neill(1989)은 많은 현장재하시험의 결과를 종합하여 모래질 지반에 현장타설 말뚝의 주면하중전이곡선을 제안한 방법은 그림2.1과 같다.

(2) Vijayvergiya (1977)

Vijayvergiya(1977)의 방법에 따른 곡선은 그림 2.2와 같다.

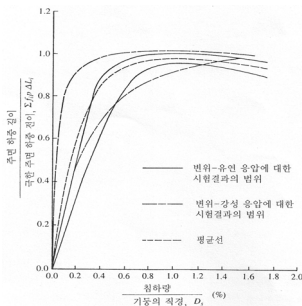


그림2.1 Reese and O'Neill (1989)의 주면하중전이곡선

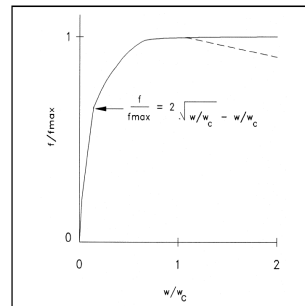


그림2.2 Vijayvergiya (1977)의 주면하중전이 곡선

#### 2.2.2 점성토에서의 주면하중전이곡선

(1) Reese and O'Neill (1989)

1988년 Reese and O'Neill(1989)은 많은 현장재하시험의 결과를 종합하여 점토질 지반에 현장타설 말뚝의 주면하중전이곡선을 제안한 방법은 그림2.3과 같다.

(2) API 기준 (1993)

API기준에 따른 제안곡선은 강관말뚝의 경우를 유한요소법으로 해석하는데 많은 연구에서 사용하였

다. 점성토의  $f-w$ 관계는 다음 그림2.4와 같다.

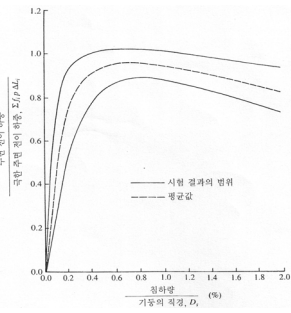


그림2.3 Reese and O'Neill (1989)의 주변하중전이곡선

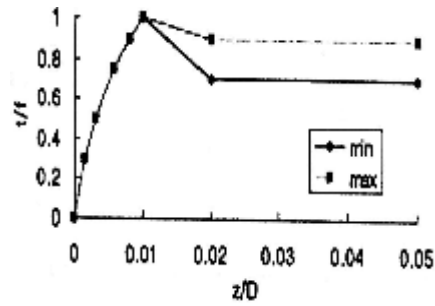


그림2.4 API 기준 (1993)의 주변하중전이곡선

### 2.2.3 선단하중전이곡선

#### (1) Reese and O'Neill (1988)

Reese and O'Neill (1988)은 많은 현장재하시험의 결과를 종합하여 모래질 지반에 시공된 현장타설말뚝의 선단하중전이곡선을 다음의 그림2.5와 같이 제안하였다.

#### (2) API 기준 (1993)

API 기준(1993)에서 선단하중전이곡선은 점성토와 사질토에 관계없이 동일하게 제시하였다. API기준에 따른 점성토의 선단하중전이관계는 다음 그림2.6과 같다.

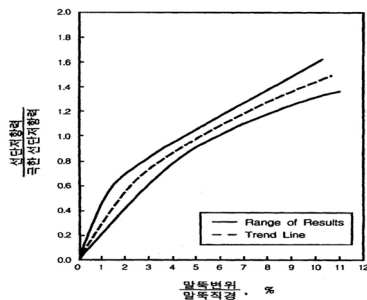


그림2.5 Reese and O'Neill(1988)의 선단하중전이곡선

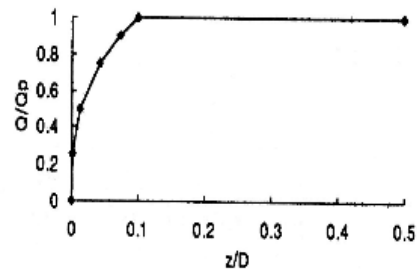


그림2.6 API 기준(1993)의 선단하중전이곡선

## 3. 현장재하시험

### 3.1 말뚝조건

표 3.1 각 말뚝의 제원

말뚝번호	말뚝직경(mm)	말뚝길이(m)	말뚝두께(mm)
TP.1	508	24	12
TP.2	609.6	73	12
TP.3	508	49.15	12
TP.4	609.6	57.4	16
TP.5	406	9.5	10

### 3.2 시험 및 분석 방법

이 시험은 하중전이 해석을 동반하는 정재하시험을 수행하였고, 마찰력은 말뚝에 축하중 계측장치를 부착 또는 매설하여 축하중의 분포를 각 재하단계별로 측정하여 하중계사이의 값을 축하중 계측계로 나누어 평균마찰력을 구한다.

### 3.3 재하시험결과

#### 3.3.1 TP.1

TP.1에서는 개단강관말뚝의 하중전이실험이 수반된 압축정재하시험을 실시하였다. 말뚝의 직경은 508mm, 두께 12mm, 길이는 24m이며 시험계획하중은 1000t이고 설계하중은 79.8ton이다. 하중재하수단으로 본말뚝 1개, 반력말뚝 8개를 사용하였다. TP.1의 재하시험결과는 그림 3.1과 그림3.2와 같다.

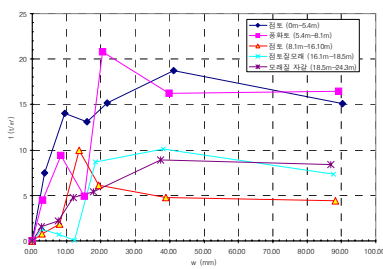


그림 3.1 TP.1 f-w 곡선

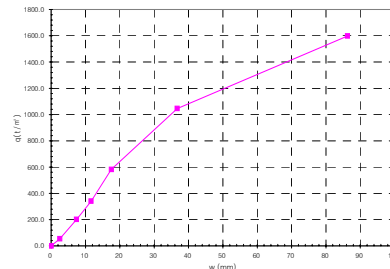


그림 3.2 TP.1 q-w곡선

#### 3.3.2 TP.2

TP.2에서는 개단강관말뚝의 하중전이실험이 수반된 압축정재하시험을 실시하였다. 말뚝의 직경은 609.6mm, 두께 12mm 길이는 73m이며 시험계획하중은 1000ton이다. 하중재하수단으로 본말뚝 1개, 반력앵커를 사용하였다. TP.2의 재하시험결과는 그림 3.3과 그림3.4와 같다.

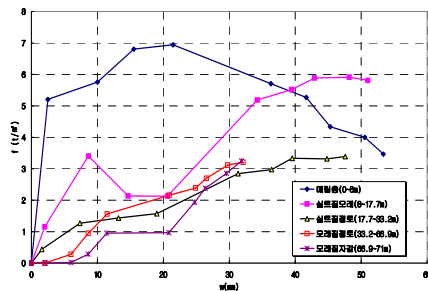


그림 3.3 TP.2 f-w 곡선

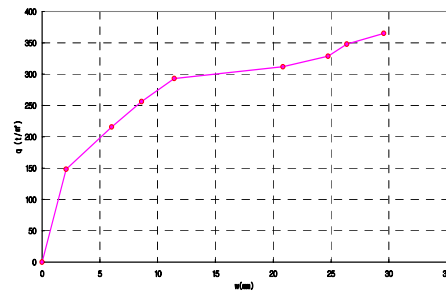


그림 3.4 TP.2 q-w곡선

#### 3.3.3 TP.3

TP.3에서는 개단강관말뚝의 하중전이실험이 수반된 압축정재하시험을 실시하였다. 말뚝의 직경은 508mm, 두께 12mm 길이는 49.15m이며 시험계획하중은 1000ton이다. 하중재하수단으로 본말뚝 1개, 반력말뚝 8개를 사용하였다. TP.3의 재하시험결과는 그림 3.5와 그림3.6과 같다.

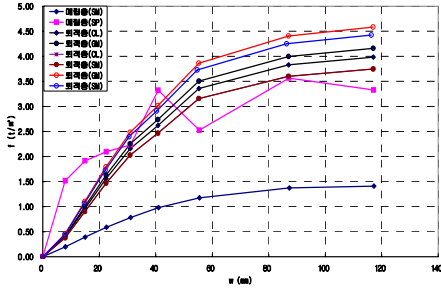


그림 3.5 TP.3 f-w 곡선

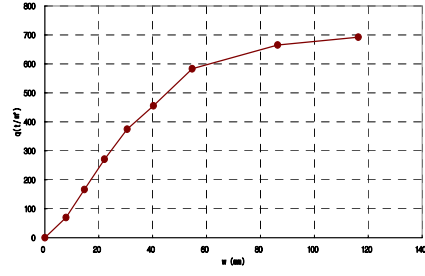


그림 3.6 TP.3 q-w곡선

### 3.3.4 TP.4

TP.4에서는 개단강관말뚝의 하중전이실험이 수반된 압축정재하시험을 실시하였다. 말뚝의 직경은 609.6mm, 두께 16mm 길이는 57.4m이며 시험계획하중은 1000ton이다. 하중재하수단으로 본말뚝 1개, 반력말뚝 8개를 사용하였다. TP.4의 재하시험결과는 그림 3.7과 그림3.8과 같다.

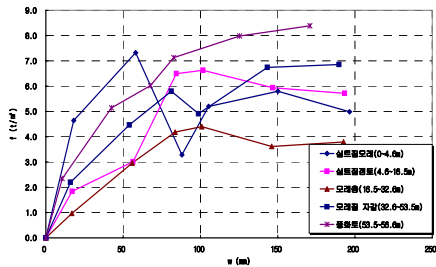


그림 3.7 TP.4 f-w 곡선

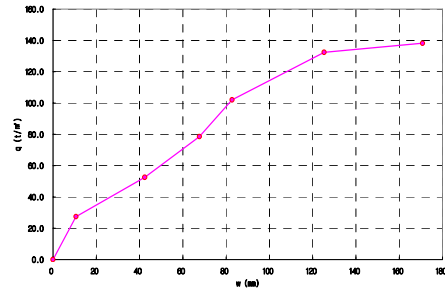


그림 3.8 TP.4 q-w곡선

### 3.3.5 TP.5

TP.5에서는 개단강관말뚝의 하중전이실험이 수반된 압축정재하시험을 실시하였다. 말뚝의 직경은 406mm, 두께 10mm 길이는 9.5m이며 시험계획하중은 600ton이다. 하중재하수단으로 본말뚝 1개, 반력말뚝 8개를 사용하였다. TP.5의 재하시험결과는 그림 3.9와 그림3.10과 같다.

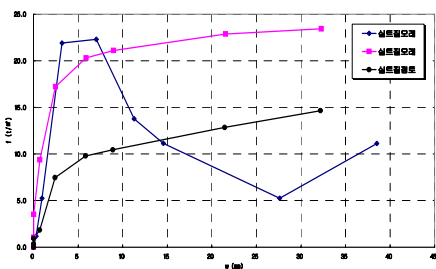


그림 3.9 TP.5 f-w 곡선

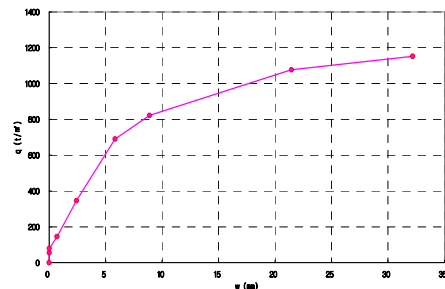


그림 3.10 TP.5 q-w곡선

## 4. 시험결과 및 비교분석

말뚝에 설치된 센서의 위치에서 계측된 지층 구간별 주면하중전이곡선을 이용하여 마찰력이 최대로 발생시의 마찰력을 최대주면마찰력으로 채택하였다. 일관된 비교를 위하여 마찰력( $f$ )대신에  $f$ 를 최대주면마찰력  $f_{max}$ 로 나눈  $f/f_{max}$ 를 사용하였으며, 변위는 지름의 영향을 고려하여 지름  $D$ 로 나누어  $w/D(\%)$ 를 사용하였다. 곡선의 분석을 통하여 대표곡선을 선정하였고 대표곡선과 최적의 상관도를 나타내는 회귀곡선을 구하여 그림에 도시하였다. 회귀곡선의 함수식은 쌍곡선함수식으로 식(1)과 같다.

$$\frac{f}{f_{max}} = \frac{(1 + \alpha) \cdot \frac{w}{D}}{(30 \cdot \alpha) + \frac{w}{D}} \quad (1)$$

여기서,  $w$ =변위,  $D$ =지름,  $\alpha$ 는 점성토와 사질토의 경우 0.1, 선단의 경우는 0.2이다.

### 4.1 점성토 주면하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교

각 현장의 점토지반의 데이터를 취합하여  $w/D$ 가 0.2증가할 때 마다  $f/f_{max}$ 에 대한 평균을 구하고 평균에 대한 쌍곡선 함수식을 이용하여 평균선을 구하여 기존의 이론곡선과 비교하였다. 점성토의 주면하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교는 다음 그림 4.1과 그림 4.2와 같다.

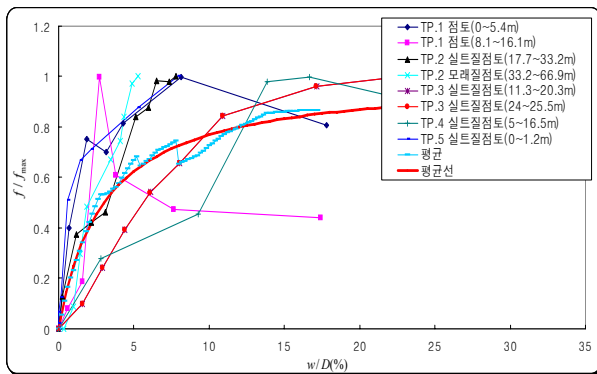


그림 4.1 점성토의 평균선 도출

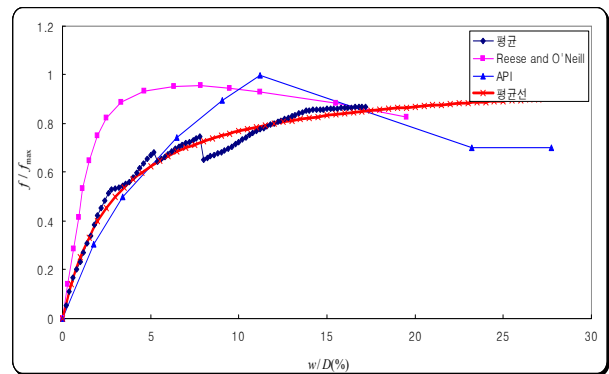


그림 4.2 평균선과 이론곡선의 비교

### 4.2 사질토 주면하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교

사질토에서도 마찬가지로 각 현장의 사질토지반의 데이터를 취합하여  $w/D$ 가 0.2증가할 때 마다  $f/f_{max}$ 에 대한 평균을 구하고 평균에 대한 쌍곡선 함수식을 이용하여 평균선을 구하여 기존의 이론곡선과 비교하였다. 사질토의 주면하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교는 다음 그림 4.3과 그림 4.4와 같다.

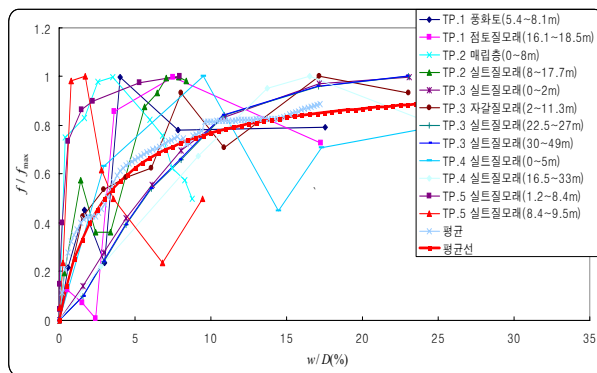


그림 4.3 사질토의 평균선 도출

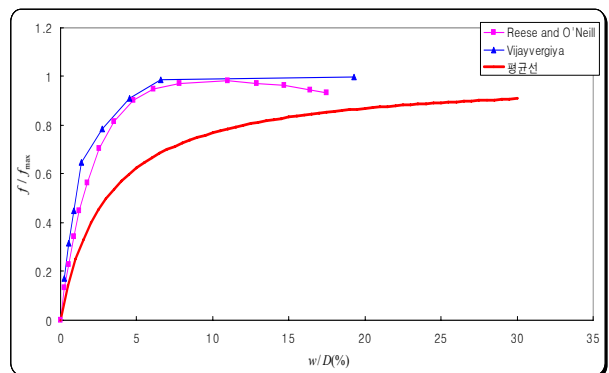


그림 4.4 평균선과 이론곡선의 비교

### 4.3 선단하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교

각 현장의 선단하중전이곡선의 데이터를 취합하여  $w/D$ 가 0.2증가할 때 마다  $q/q_{max}$ 에 대한 평균을 구하고 평균에 대한 쌍곡선 함수식을 이용하여 평균선을 구하여 기존의 이론곡선과 비교하였다. 선단하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교는 다음 그림 4.5와 그림 4.6과 같다.

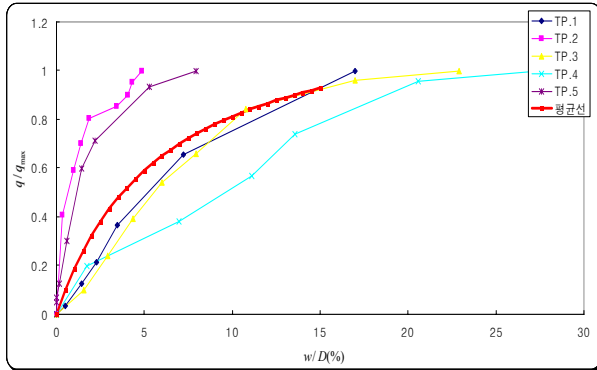


그림 4.5 선단하중전이곡선의 평균선 도출

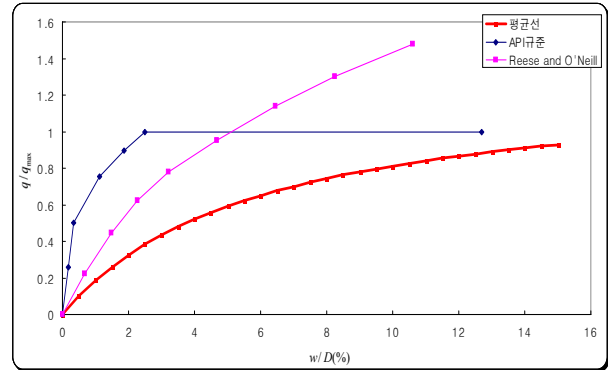


그림 4.6 평균선과 이론곡선의 비교

## 5. 결론 및 향후방향

본 연구에서는 강관말뚝의 하중전이곡선을 도출하여 기존의 하중전이 이론곡선과 비교분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 점성토에서 주변하중전이곡선은 API규준과 비교적 유사하게 나타났으며, 사질토에서의 주변하중전이곡선과 선단하중전이곡선의 평균선은 이론곡선과 일치하지 않았다.

둘째, 일반적으로 평균선이 이론곡선보다 작게 나타나는 경향을 볼 수 있었다.

향후 더 많은 현장시험결과를 이용하여 국내지반에서 적용할 수 있는 강관말뚝의 하중전이곡선을 도출하기 위한 노력이 필요할 것으로 보인다.

## 참고문헌

- 日本道路協會(2002). *道路橋示方書・同解説*, pp.353-372
- 地盤工學會 (2000), *基礎の沈下予測と實際*, 第1編 第2章 基礎の沈下の予測法 2.2.1 杭基礎.
- 土質工學會 (1985), *杭基礎の設計法とその解説*, 第5章 杭の鉛直支持力の算定.
- American Petroleum Institute(API). *Recommended Practice of Planning, Designing, and Construction of Fixed Offshore Platforms*, Report No. API-RF-2A, Dallas, pp.115
- Briaud, J. L., Tucker, L. M., Lytton, R. L. and Coyle, H. M.(1985), "Behavior of Piles and Pile Groups", Report No.FHWA/RD-83/038, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966), "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 92, No. SM6, pp.1~26.
- Kraft, K. M., Ray, R. P. and Kagawa, T. (1981), "Theoretical t-z curves," ASCE, Vol. 107, No. GT11, pp.1543~1561.
- Meyershof, G.G.(1976). "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 102, No. GT3, pp.197-228.
- Reese, L. C. and O'Neill, M. W.(1988), "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods," *Publication No. FHWA-HI-88-042*, Federal Highway Administration, Washington, D. C.
- Reese, L. C., and O'Neil, M. W. (1989). "New Design Method for Drilled Shafts from Common Soil and Rock Tests," *Proceedings, Foundation Engineering: Current Principles and Practices*, American Society of Civil Engineers, Vol.2, pp.1026-1039.
- Vijayvergiya, V.N. (1977). "Load-movement characteristics of piles", *Proc. 4th Annual Symposium of the Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Division of ASCE*, ASCE, Long Beach, Calif., Vol.2, pp.269-284.