

t-z/P-y 곡선에 의한 말뚝의 극한 수직 및 수평 지지력 예측

Evaluation on Ultimate Vertical and Horizontal Load
Bearing Capacity of Pipe Pile by Means of t-z/P-y Curves

최용규¹⁾, Choi, Yongkyu, 송기섭²⁾, Song, Ki Seop, 이상현³⁾, Lee, Sang Heon,
송훈³⁾, Song, Hoon, 이민희⁴⁾, Lee, Min Hee

- 1) 정회원, 경성대학교 토목공학과 조교수
- 2) 정회원, 삼성건설(주) 기술연구소 부소장
- 3) 정회원, 삼성건설(주) 기술연구소 선임 연구원
- 4) 부산대학교 대학원 토목공학과 석사과정

Abstract : Currently, static load test, statnamic test and PDA test have been used to evaluate load bearing capacity of pile foundation. During these test methods, static pile load test has been known to be the best reliable, but it needs more expenses and plenty of time. In the case of insufficient capacity of load test facilities, ultimate pile capacity could not be confirmed. Other Pile load test methods have been known to be lower reliable. In this study, based on PAR(Pile Analysis Routines), evaluation method of ultimate pile capacity will be suggested and ultimate horizontal and vertical capacity will be evaluated using in-situ pile load test result performed to a 813mm diameter steel pipe pile.

1. 서론

말뚝 기초의 지지력을 예측하기 위한 재하시험 방법으로는 정재하 시험법, 정·동재하 시험법 (statnamic test), 말뚝 향타분석기에 의한 방법 (PDA 방법), 그리고 특별히 제안되고 있는 각종 방법들을 들 수 있다. 이들 중, 가장 신뢰도가 높은 것으로는 정재하 시험법을 들 수 있으나, 여기에는 많은 시험 경비와 시간이 수반되어야 하며, 재하시험 장치의 용량을 충분하게 하지 못할 경우에는 극한 지지력을 확인하지 못하고 설계 하중의 지지 여부만 확인하는데 그치는 경우도 상당하다. 그 외 재하 시험 방법들은 간접적인 수단이나 이론적 해석들을 이용한 극한 지지력 추정방법들이므로, 그 신뢰도는 극히 낮은 것으로 알려져 있다(한국 지반공학회, 1993).

본 연구에서는 단일 말뚝 해석용 전문 프로 그램인 PAR (Pile Analysis Routines)을 이용하여 말뚝의 극한 지지력을 현장에서 수행된 말뚝 재하 시험 결과를 토대로 개단 말뚝의 수평 및 수직 극한 지지력을 예측하여 보고자 한다.

2. 말뚝 해석 프로그램 PAR (Pile Analysis Routines)

2.1. 개요

PAR의 구성 조직도는 그림 1에 나타내었는데 본 프로그램은 수직, 수평하중, 진동하중, 지진기록을 이용한 하중 등에 대하여도 해석이 가능하며, 지반의 P-y, t-z/q-z특성을 이용한 비선형 해석법을 사용하고 있다. 말뚝은 유한요소로 분할되며, 각 요소는 비선형 3차원 보-기둥 요소로 모델링되어 진다.

2.2. 비선형 3차원 보-기둥요소 (nonlinear 3-dimensional beam-column element)

그림 2에는 PAR에서 사용하는 비선형 3차원 보-기둥 요소를 나타내었는데, 여기에는 2개의 외부점 (external node), 2개의 강소성 힌지 (rigid - plastic hinge), 2개의 내부점 (internal node), 그리고 탄성보 요소로 구성되어 있다. 일반 좌표계에서 외부점들은 각 점에서 6개의 자유도 (3개의 변위와 3개의 회전)을 갖으며, 국부 좌표계에서는 총 6개의 변위를 갖는다. 강소성힌지의 경우에는 각 힌지가 4개의 자유도 (축방향 변위와 3개의 회전)로 구성되나, 완전 힌지 (complete hinge)인 경우에는 총 6개의 자유도로 구성된다. 내부 점들은 총 6개의 자유도를 갖는다.

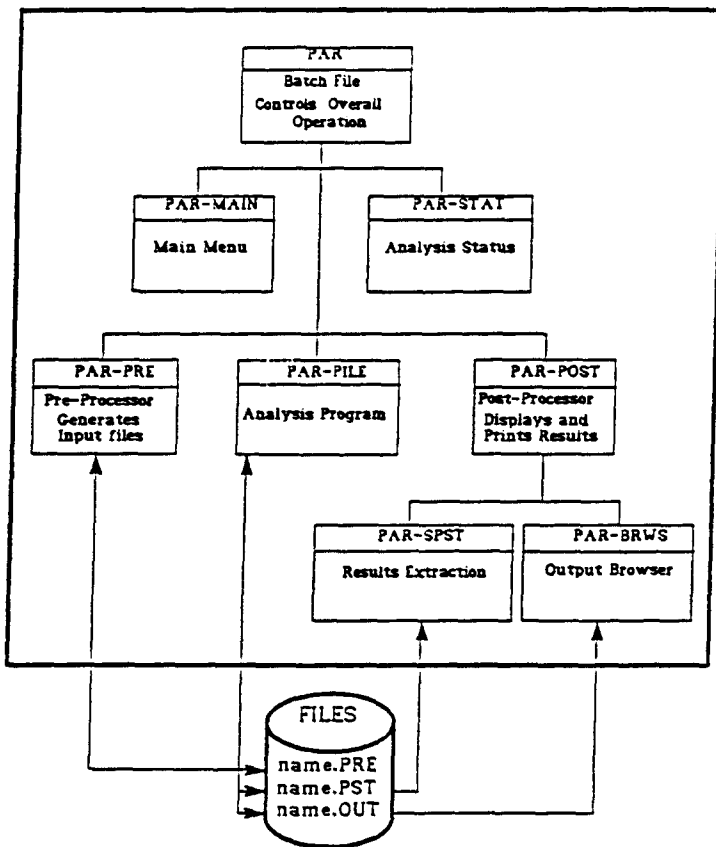


Fig. 1. PAR program organization

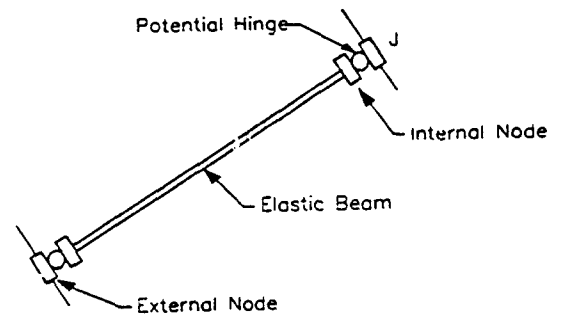


Fig. 2. Nonlinear three-dimensional beam-column element.

국부 (local) 좌표계에서의 완전 힌지와 탄성보 요소에 대한 유연도 매트릭스를 구하면 다음과 같다.

$$\{w\} = [f] \cdot \{p\}$$

여기서, $\{w\} = \{w_1, w_2, \dots, w_6\}^T$: 국부 좌표계에서 변위, $\{p\} = \{P_1, P_2, \dots, P_6\}^T$: 국부 좌표계에서의 요소내부 하중, $[F] = (6 \times 6)$ 의 유연도 매트릭스 (flexibility matrix) = $[F_1] + [F_2]$, $[F_1] = \{w\}^T$ 의 항으로 탄성보에 대해 작성된

유연도 매트릭스, 그리고 $[F_2] = \{v\}^T$ 의 항으로 완전힌지(complete hinge)에 대해 작성된 유연도 매트릭스이다.

내부 자유도 $\{W\}$ 에 상응하는 요소의 node에서의 하중 매트릭스 $\{P\}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{P\} = [K] \cdot \{w\}$$

여기서, $\{P\} = \{M_{yi}, M_{yj}, M_{zi}, M_{zj}, M_x, F_x\}$, $[K] = [F]^{-1}$: 국부 좌표계 (6 x 6)에서의 강도 매트릭스이다.

전체(global) 좌표계로 합성해 주면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{q\} = [a]^{-1} \cdot \{v\}$$

여기서, $\{q\} = \{q_1, \dots, q_{12}\}$: 전체 좌표계에서의 변위 매트릭스, $[a] = (6 \times 12)$ 의 좌표변환 매트릭스(transformation matrix), $\{v\} = \{v_1, \dots, v_6\}$: 국부 좌표계에서의 변위 매트릭스이다.

전체 좌표계에서의 하중 매트릭스를 전체 강도 매트릭스 $[\bar{K}]$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{P\} = [\bar{K}] \cdot \{q\}$$

2.3. P-y 모델

2.3.1. 사질토

O'Neill et al. (1983)은 사질토에서의 수평 저항력-변형 (P-y) 관계는 비선형적이며 임의 깊이 H에서의 P-y 곡선을 다음과 같이 제안하였다 (그림 3(a) 참조).

$$P = A \cdot P_u \cdot \tan h \left[\frac{K \cdot H}{A \cdot P_u} y \right]$$

여기서, A = 재하조건에 따른 계수인데, 주기하중의 경우 0.9이고, 정하중인 경우 $A = 3.0 - H/D$ 이다. 정하중 P_u 는 깊이 H에서의 극한 지지력 값 (KN/m)이며, 계산공식은 O'Neill et al. (1983) 참조하면 된다. K = 초기 지반 반력 계수(KN/m³)이며, y = 수평변위 (mm)이고, H = 깊이 (mm)이다.

2.3.2. 연약 점토

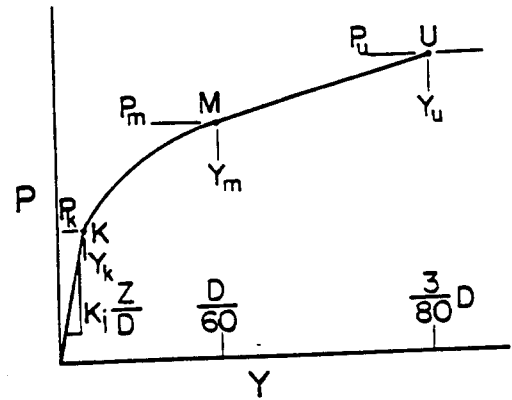
Matlock (1970)은 연약 점토에서의 정하중 상태의 P-y 곡선을 다음과 같이 제안하였다 (그림 3(b)참조).

$$P = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot P_u$$

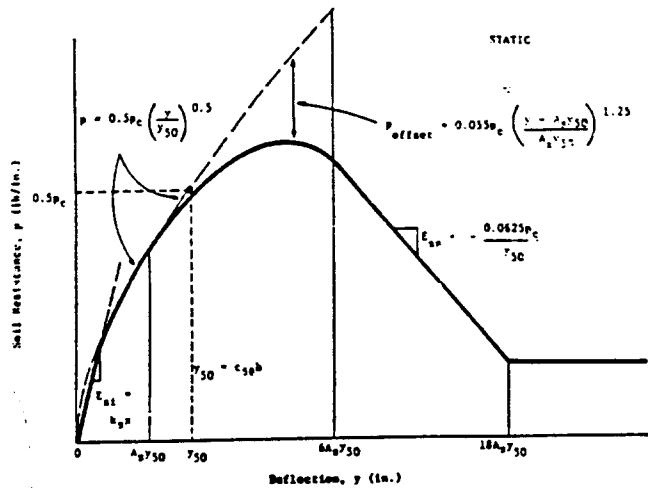
여기서, $y = 2.5 \epsilon_{50} \cdot D$ 이고, ϵ_{50} = 일축압축강도의 1/2에 해당하는 변형율이며, D = 말뚝의 직경이다.

2.3.3. 굳은 점토

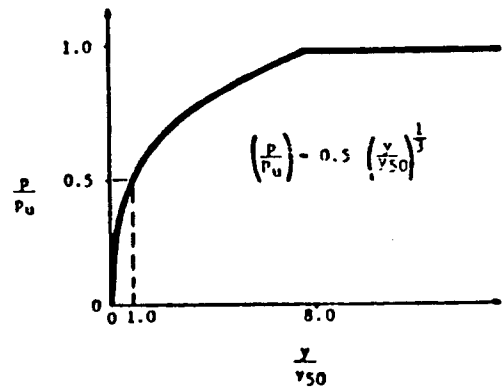
Reese et al. (1975)은 굳은 점토에서의 정하중상태의 P-y 곡선을 그림 3(c)와 같이 제안하였다.



(a) P-y curve in sand (O'Neill, 1983)



(c) P-y curve in stiff clay (Reese et al., 1975)



(b) P-y curve in soft clay (Matlock, 1970)

Fig. 3. P-y model

3. PAR을 이용한 극한 지지력 예측

3.1. 극한 지지력 예측 방법

3.1.1. 극한 지지력의 예측

말뚝머리 하중을 단계별로 증가시키면서 각 단계마다 하중을 입력하여 침하량을 계산할 수 있다. 침하량이 급격히 증가할 때 (즉, 파괴하중에 도달될 때)까지 증가시켜 해석을 반복하여 하중과 그에 상응하는 침하량을 도출하여 하중- 침하량 관계를 구할 수 있으며, 여기서 수직 극한 지지력을 예측할 수 있다.

3.1.2. 수평 극한 지지력의 예측

수평지지력은 말뚝 두부의 고정상태에 크게 좌우되어진다. PAR에서는 말뚝 두부의 고정 (fixed), 힌지 (hinged) 그리고 자유지지된 (free-headed) 상태로 해석 가능하며 자유 및 고정된 말뚝 두부 상태에서는 말뚝 머리의 수평변위를 입력시켜 해석을 수행하며, 그 변위에 상응하는 말뚝의 수평지지하중 (또는 모멘트)을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 수평변위와 수평하중을 도시하여 수평하중-수평변위 관계를 구할 수 있으며, 여기서 수평극한 지지력 (또는 모멘트)을 예측할 수 있다. 단, 힌지된 말뚝 두부 고정상태에서는 말뚝머리의 회전각을 입력시켜 수평하중이나 모멘트를 계산할 수 있다.

3.2. 해석결과의 분석

3.2.1. 해석사례 선정

00대교의 교각기초로 사용될 개단강관 말뚝의 제원, 말뚝 및 주변지반의 모델링 그리고 지반의 지층 상태등을 그림 4에 나타내었다. 여기서, 각 지층의 단위 중량과 비배수 전단강도(사질토의 경우에는 내부 마찰각)는 00건설 지반 보고서 (1995)를 참고하였다. 외부 직경 812.8 mm, 강재 두께 16.0 mm인 강관말뚝이 선단이 개방된 채로 지중에 타입되었으며, 설계 수직 및 수평 하중은 1.89, 0.15 MN이었다.

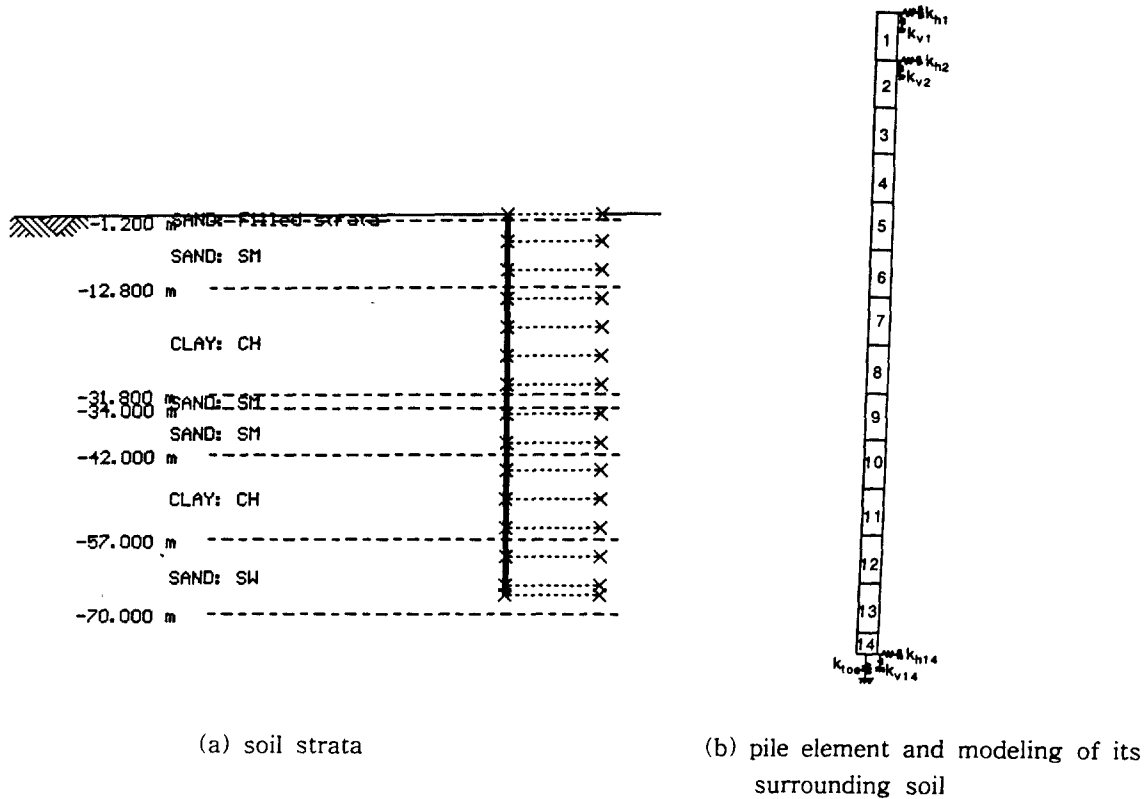


Fig. 4. Soil strata, pile element and modeling of its surrounding soil.

3.2.2. 해석 결과 보고 및 비교 분석

수직하중과 침하량의 관계는 그림 5에 나타내어져 있다. 여기서, PAR에 의한 해석결과에 따르면, 말뚝의 수직 극한 지지력은 9.15 MN으로 예측할 수 있었는데 예측된 하중 - 침하량의 관계는 정재하 시험 결과와 잘 일치하였다. oo건설연구소에서 동일한 말뚝에 실시한 정·동적 말뚝 재하시험과 PDA시험 결과로부터 추정된 최대 시험하중과 극한 지지력값 (oo건설기술 연구소, 1995)도 그림 5에 나타내었는데, 정·동적 재하시험에서는 6.1 MN 이고, 특히, PDA 시험에서 추정된 극한 지지력값은 말뚝 최종 심도까지 관입시킨 직후 4.4 MN, 말뚝 관입후 5~7일 경과된 후 7.0 MN으로 측정되어졌는데 (oo건설 기술 연구소, 1995), 여기서, 이 값들은 극한 지지력값보다 작은 것을 알 수 있다. 여기서, 정재하 시험은 약 7.1MN까지만 재하한 후 실험을 완료하였으므로, 정적인 재하 시험으로부터 극한 지지력을 예측하는 것은 곤란하였다. 재하장치의 용량을 설계하중의 2배 이상으로 하였으므로, 극한 지지하중까지 재하하는 것은 곤란하였으며, 따라서 이 정재하시험은 설계하중의 지지 여부만을 확인하는데 목적이 있다고 할 수 있다.

수평하중과 수평변위와의 관계는 그림 6에 나타내었으며, 말뚝머리 고정과 자유지지된 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 여기서, 머리가 자유지지된 말뚝의 허용 수평지지력은 약 0.15 MN으로 예측할 수 있는데, 이것은 말뚝의 설계 수평하중 (0.15 MN)과 비슷한 값이었다. 그러나, 재하 시험에 사용된 말뚝의 머리 고정상태는 자유지지와 고정된 것의 중간형태로 볼 수 있어 힌지된 상태로 가정하면 (oo기초 연구소, 1995), 허용 수평하중은 약 2.0 MN으로 예측할 수 있을 것이다.

본 사례 해석에 사용된 지층의 분할된 각 위치에서의 P-y곡선과 t-z/q-z 곡선을 그림 7에 나타내었다. 이 곡선들은 2절에 설명된 이론들을 사용하여 PAR에 의해 자동 생성되어진 결과이며, 다른 모델들에 의한 해석은 비선형곡선들을 계산하여 입력시켜주어 수행할 수도 있다.

이외에도 PAR을 이용하여 말뚝의 관입 깊이에 따른 하중 전이특성, 마찰응력의 분포 특성, 말뚝의 침하량, 모멘트 분포 특성 등도 구할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 oo현장에서 수행된 수평 및 수직 말뚝 재하시험 결과들에 기초하여 PAR을 이용하여 수행된 해석 결과를 비교하고 말뚝의 수직 및 수평 극한 지지력을 예측하는 방법을 제안하였다. 본 연구의 결론들은 다음과 같다.

1. 수직하중을 단계적으로 입력시켜 해석을 수행하면 PAR에 의하여 말뚝의 수직하중과 침하량 관계를 구할 수 있으며, 여기서 말뚝의 수직 극한 지지력을 예측할 수 있다.
2. 수평변위를 단계적으로 입력시켜 해석을 수행하면 말뚝 머리가 자유지지된 말뚝에 대하여 말뚝의 수평하중과 수평변위 관계를 구할 수 있는데, 여기서, 말뚝의 수평 극한 지지력을 예측할 수 있다.
3. 말뚝재하 시험 결과들 중 PDA시험에 의한 극한 지지력은 정재하 시험과 정·동재하시험에 의한 그것보다 작은 값을 나타내었다.
4. PAR에 의한 수평 및 수직 극한 지지력 예측은 간편한 잇점이 있으나, 현장 말뚝 재하시험값들에 의한 검증이 충분하지 않으므로 이에 대한 연구 및 적용성 검토가 수행되고 있으며 조만간 그 결과를 전문학회지에 게재할 예정이다.

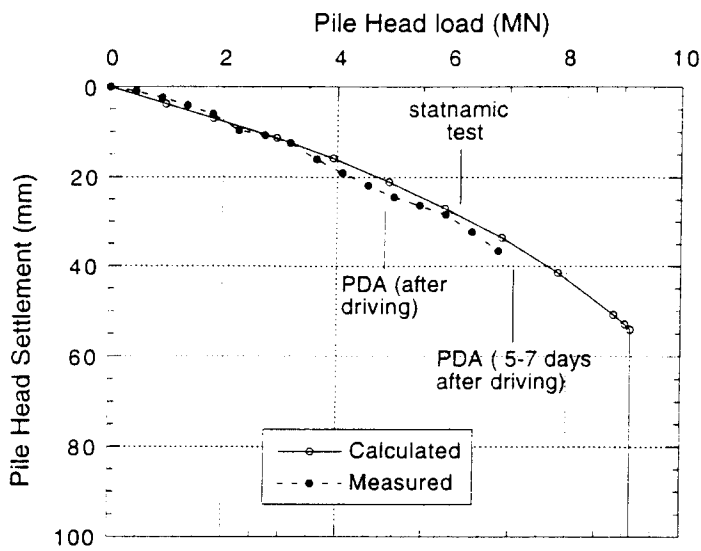


Fig. 5. Comparisons of vertical load versus settlement curves obtained by various pile load test methods.

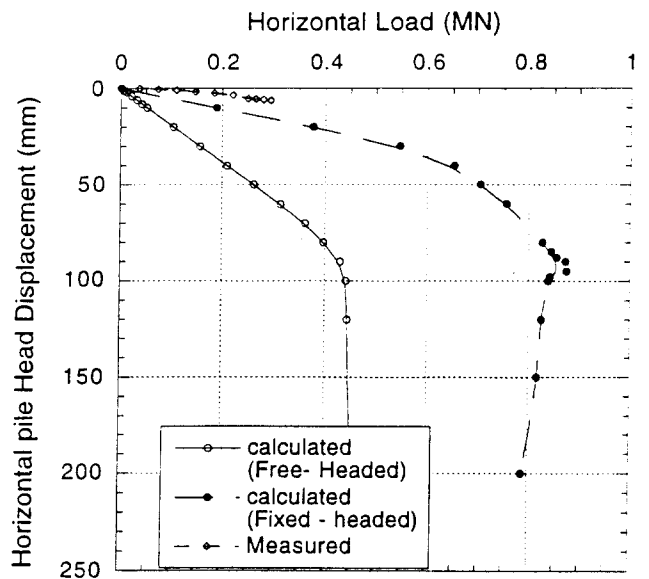


Fig. 6. Comparisons of horizontal load versus horizontal deflection curves

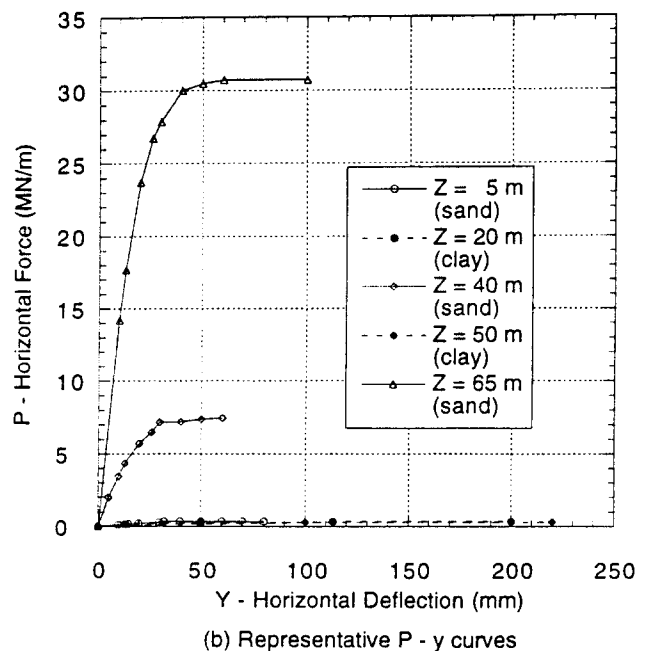
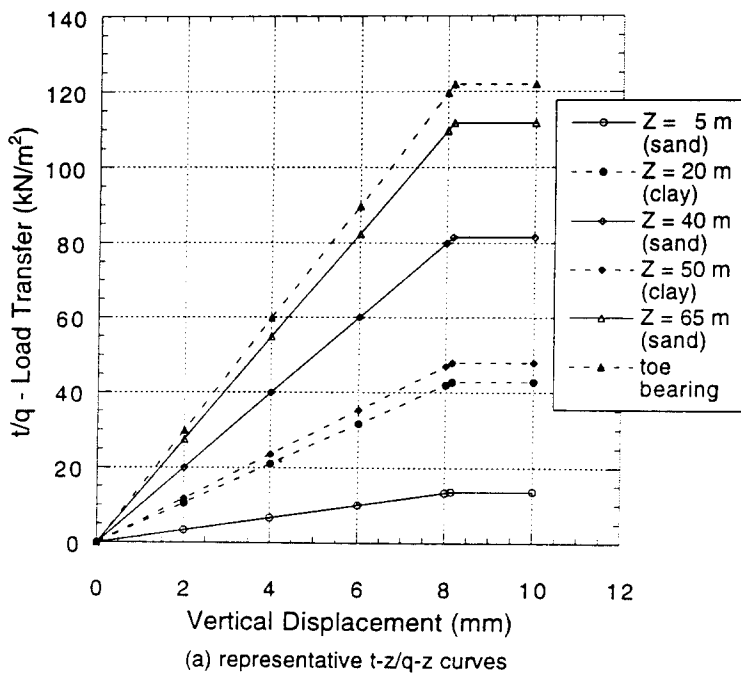


Fig. 7. Comparisons of representative horizontal load versus horizontal deflection curves developed by PAR of each soil stratum at the chosen test site

참고문헌

- 한국 지반 공학회지(1993), 깊은 기초, 지반공학 시리즈4, pp. 265~267
- oo건설(주) 기술 연구소(1995), oo공업 단지 진입 도로(동측) 축조공사 실시설계 지반조사 보고서, 중앙 지하 개발 연구소.
- oo건설(주) 기술연구소(1995), oooo대교 시향타 말뚝 재하시험 결과보고서
- oo건설(주)(1995), oo공단 진입도로 현장 말뚝 재하 시험 보고서, oo기초 연구소
- oo건설(주)(1995), oo공단 진입도로 현장 말뚝 수평재하 시험 보고서, oo기술 연구소
- Matlock, H.(1970), Correlations for Design of Laterally-Loaded Pile in Soft Clay, Paper No. OTC 1204, Proceedings, 2nd OTC, Houston, Texas, Vol.1, 1970, pp. 577-594
- O'Neill, M.W. and Murchinson, J.M.(1983), An Evaluation of P-y Relationships in Sand, A Report to the API (PRAC 82-42-1).
- PMB software(1988), PAR (Pile Analysis Routines), User Manual, Theoretical Manual, Application Manual, Reference Manual
- Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms(1989), American Petroleum Institute Recommended Practice 2A(RP 2A), API, Washington, D.C
- Parker, F., Jr. and Reese, L.C.(1970), Experimental Study of Behavior of Single Piles in Sand Under Lateral and Axial Loading, Research Report No. 117-2, Center for Highway Research, Univ of Texas, Austin, Texas