

PHC 항타말뚝에 대한 CPT 선단 지지력 산정식의 적용성

Applicability of CPT-based Toe Bearing Capacity of PHC Driven Piles

Le, Chi Hung¹

정 성 교² Chung, Sung-Gyo

김 성 렬³ Kim, Sung-Ryul

Abstract

As CPT penetration tends to show a similar behavior to that of pile driving, a number of methods for estimating the toe bearing capacity of piles based on CPT data have been proposed. To evaluate the applicability of the methods in this country, a total of 172 dynamic load tests data on PHC piles and 82 CPT data at a site in the Nakdong River estuary were collected. A specific four-step procedure was adopted for the selection of the reliable data, and statistical techniques were then applied to the analysis of the applicability. The results indicated that among a total of 10 CPT-based methods applied, the best one is the Aoki method (1975), followed by the LCPC (1982), ICP (2005) methods and others.

요 지

CPT의 관입과 말뚝의 항타는 그들의 거동이 아주 유사하기 때문에 CPT 결과를 이용한 말뚝의 지지력 예측방법이 많이 제안되어 있다. 본 연구에서는 CPT 결과를 이용한 선단지지력 산정공식의 국내 적용성을 분석하기 위하여 낙동강 하구 대심도 연약지반 현장에서 시공된 PHC 항타말뚝을 대상으로 총 172본의 동재하시험 자료와 82개소의 CPT 자료를 수집하였다. 신뢰성 높은 자료 선정을 위해 4단계의 보정절차를 거쳤으며, 통계적 기법을 이용하여 각 공식의 적용성을 분석하였다. 그 결과, 총 10가지의 공식 중에서 Aoki 방법(1975), LCPC 방법(1982), ICP 방법(2005)의 순서로 그 적용성이 높은 것으로 나타났다.

Keywords : Cone penetration test, Dynamic pile load test, PHC pile, Soft deposit, Toe bearing capacity

1. 서 론

CPT에 의한 지반조사는 세계적으로 널리 수행되고 있다. 과거에는 CPT 콘 관입장비의 재하용량이 작았기 때문에 CPT 시험이 주로 연약 점토층 또는 느슨한 사질토층의 조사에만 이용되어 왔으나, 최근에는 큰 관입력을 가진 대형 CPT 장비가 개발되면서 대심도의 단단한 점토 및 사질토 지반의 조사에도 확대 적용되고 있다.

특히, CPT 시험에서 얻어지는 콘 선단저항력과 주변 저항력은 말뚝의 선단지지력 및 주변마찰력과 연관성이 크기 때문에 CPT 결과를 이용하여 말뚝 지지력을 산정하는 공식이 여러 연구자들에 의하여 제안되어 왔다. 따라서 여러 나라에서는 그 지역의 지반 및 말뚝 특성에 적합한 지지력 공식을 개발하여 설계에 적용하고 있다.

국내의 경우에도 기존의 CPT 지지력 공식에 대한 적용성을 분석한 바 있지만, 해외의 실험결과에 국한되어

1 사원, 진영 엔지니어링 (Engineer, Jinyoung Engrg. & Consultants CO., Ltd.)

2 정회원, 동아대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.)

3 정회원, 동아대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ., sungryul@dau.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

있다(윤길립, 1997; 김지환 등, 2007). 즉, 김지환 등(2007)은 국외 말뚝재하시험 사례 및 지반조사 결과를 이용하여 4가지 CPT 지지력 공식을 적용한 결과, 항타말뚝에 대하여 LCPC 방법(Bustamante & Gianceselli, 1982)이 가장 좋은 적용성을 보였다. 그러나, 국내의 지반 및 말뚝 특성을 고려한 관련 연구는 이제까지 수행된 사례가 없다.

본 연구에서는 세계적으로 널리 사용되고 있는 CPT에 근거한 지지력 공식(‘CPT-지지력 공식’이라 칭함)에 대한 국내 적용성을 규명하는데 목적이 있다. 이를 위하여 낙동강 하구지역에 분포하는 대심도 모래지반을 대상으로 수행된 CPT 결과를 비교적 잘 알려진 CPT-선단 지지력 공식에 적용하여 말뚝의 선단지지력을 평가하였으며, 이 결과는 동재하 시험결과와의 비교를 통하여 그 방법의 적용성을 분석하였다.

2. CPT 결과를 이용한 선단지지력 산정공식

사질토 지반에 지지되는 말뚝의 CPT 선단지지력 공식 중 표 1에서 보는 바와 같이 총 10가지의 공식을 선정

하였다. 본 공식들은 다음과 같이 크게 3가지의 측면에서 다른 특징을 가지고 있다.

- ① 콘 선단저항력의 영향범위: 말뚝 선단 위 1D~8D (D=말뚝직경)와 말뚝 선단 아래 1.5D~4D의 범위 내에서 상이한 영향범위의 고려
- ② 영향범위 내에서 콘 선단저항력의 대표 값을 산정하는 방법
 - 기하평균법: Eslami & Fellenius법
 - 산술평균법 + 보정절차: LCPC법
 - 최소경로법: Schmertmann법, UWA법
 - 단순 산술평균법: 그 외 방법
- ③ 보정계수: 말뚝종류, 말뚝 시공방법, 흙의 종류 등에 따라 상이한 보정계수의 적용

3. 지반조건 및 동재하 시험 개요

3.1 지반조건

본 연구가 수행된 지역은 부산 낙동강 하구에 위치한

표 1. CPT 결과를 이용한 선단지지력 산정공식 요약

구분	단위 선단지지력, r_t
Aoki 방법 (Aoki와 De Alencar, 1975)	$r_t = q_{ca}/F_b \leq 15\text{MPa}$ q_{ca} = (말뚝선단 위 8D~아래 4D) 범위에서 콘선단저항력(q_c)의 산술평균값 F_b =말뚝종류에 따른 계수 (PHC 항타말뚝의 경우 1.75)
LCPC 방법 (Bustamante와 Gianceselli, 1982)	$r_t = k_b \times q_{eq}$ q_{eq} = (말뚝선단 위 1.5D~아래 1.5D) 범위에서 보정절차가 적용된 q_c 값의 산술평균값 k_b = 지반종류와 말뚝 설치방법에 따른 계수 = 0.15~0.6
ICP 방법 (Jardine 등, 2005)	모래지반 : $r_t = \left[1 - 0.51 \log \left(\frac{D}{D_{CPT}} \right) \right] \times q_{ca}$, 여기서 D_{CPT} = 콘 rod의 직경 q_{ca} = LCPC 방법과 동일하게 산정
Meyerhof 방법 (Meyerhof, 1983)	$r_t = C_1 \times C_2 \times q_{ca}$ q_{ca} = (말뚝선단 위 4D~아래 1D) 범위 내에서 q_c 의 산술평균값 C_1 =크기효과를 고려한 보정계수; C_2 =조밀층 관입에 대한 보정계수
Penpile 방법 (Clisby 등, 1978)	모래지반: $r_t = 0.125 \times q_{ca}$ q_{ca} =말뚝선단부 근처의 3 지점에서 q_c 측정값의 평균값
Philipponnat 방법 (Philipponnat, 1980)	$r_t = k_b \times q_{ca}$ q_{ca} = 말뚝선단 위 3D~아래 3D 범위 내에서 q_c 의 산술평균값 k_b =지반종류에 따른 계수= 0.35-0.50 (본 연구에서는 0.4 적용)
Schmertmann 방법 (Schmertmann, 1978)	$r_t = (q_{c1} + q_{c2})/2 \leq 15\text{MPa}$ q_{c1} =말뚝선단 아래 0.7~4D 범위에서 최소경로법을 이용한 평균 q_c 값 q_{c2} =말뚝선단 위 8D 내에서 최소경로법을 이용한 평균 q_c 값
UWA 방법 (Lehane 등, 2005)	$r_t = 0.6 \times q_{ca}$, 폐단말뚝에 적용 q_{ca} = Schmertmann 방법과 동일하게 산정
Zhou 방법 (Zhou 등, 1982)	$r_t = \alpha \times q_{ca}$ q_{ca} = (말뚝선단 위 4D~아래 4D) 범위 내에서 q_c 의 산술평균값 α =지반종류에 따른 보정계수
Eslami&Fellenius방법 (Eslami와 Fellenius, 1997)	$r_t = C_t \times q_{eq}$ q_{eq} = (말뚝선단 위 8D~아래 4D) 범위내에서 보정 콘 선단저항력 q_c 의 기하 평균값; $C_t = 1/3 \times D$

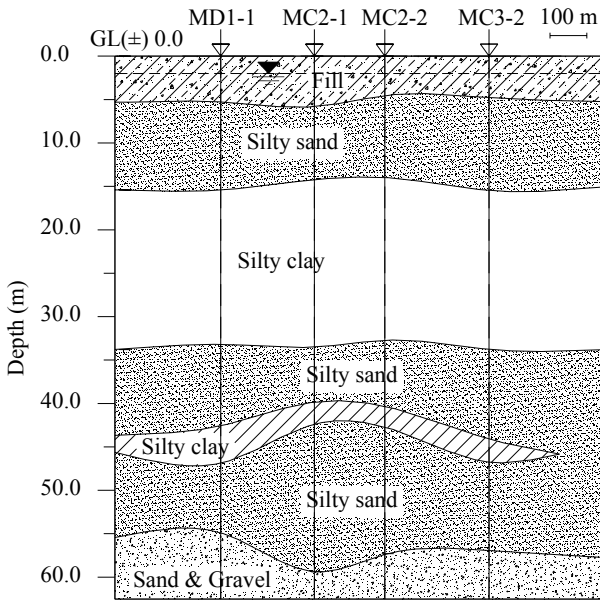


그림 1. 대상지역의 지층구성

명지주거지역으로, 대심도 연약지반으로 구성되어있다. 그림 1에서는 대상지역의 지층조건을 보여준다. 실험이 수행된 곳의 지층구조는 상부에서부터 매립층 및 실트질 모래층(0~15m), 연약점토층(15~33m), 연약 실트질 점토층이 포함된 조밀한 모래층(33~57m), 그리고 그 하부에 모래 자갈층으로 구성되어 있다. 상부 매립층은 약 5m 두께의 매립층이 존재하고 있는데, 이는 1990년대 중반에 매립이 실시된 것으로 보고되고 있다. 본 지역의 지반특성은 Chung 등(2002, 2005, 2007)의 연구에서 자세히 볼 수 있다.

그림 2는 현장에서 수행된 총 82개소의 CPT 자료 중 대표적인 CPT 주상도를 보여준다. 본 연구를 위해 도입한 CPT 장비는 GeoMil사에서 개발한 장비로서 20ton의

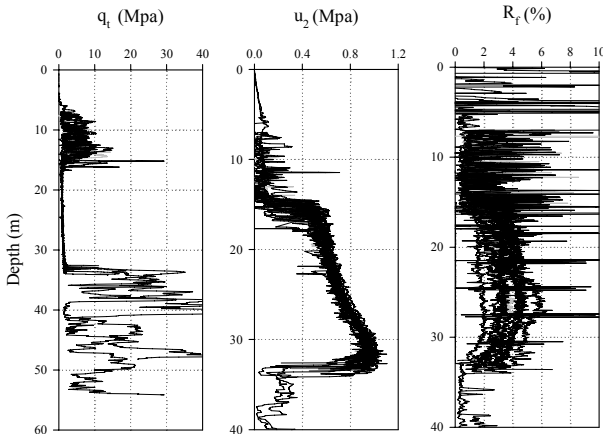


그림 2. 대상지역의 대표적인 CPT 조사결과 (q_t = 보정된 콘 선단저항력, u_2 = 간극수압, R_f = 마찰저항비)

CPT 콘 관입력을 가지고 있다. 사용된 콘의 면적은 10cm^2 이며, 선단각은 60° 이고 관입속도는 2cm/sec 이었다. 본 장비는 큰 관입력 때문에 30m 깊이에 위치한 단단한 모래층($q_c > 30\text{MPa}$, $\text{SPT } N > 50$)을 관통하여 약 55m 깊이에 위치한 모래 자갈층까지 연속하여 관입할 수 있었다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 하부 모래층은 위치에 따라 연약 점토층을 포함하기도 하며, 밀도가 크게 상이하여 q_t 값의 변화가 심하다는 것을 알 수 있다.

3.2 동재하 시험 및 결과

본 연구에서는 정재하 시험결과보다는 동재하 시험 자료를 이용하였다. 왜냐하면, 일반 정재하시험의 경우 극한지지력을 확인하거나 선단지지력과 주면마찰력을 분리 측정할 수 있는 자료 수가 절대적으로 부족하다. 이에 비해, 동재하 시험은 국내에서 일정한 비율의 말뚝에 대해 의무적으로 수행되므로 시험자료의 수가 많으며, 추가적인 분석에 의해 선단지지력과 주면마찰력을 분리하여 산정할 수 있다. 또한, 동재하 시험의 수행 및 분석에 대한 지속적인 개선이 이루어짐에 따라 최근에는 동재하 시험결과가 일반 정재하시험과 비슷한 수준의 신뢰성을 가지는 것으로 확인되고 있다(Likins 등, 1996). 한편, 선단지지력만을 연구대상으로 적용한 이유는, 동재하시험을 실시하는 시점에 따라 초기 항타시험(EOID)과 재항타시험(Restrike)으로 구분되는데, 초기 항타시험은 말뚝 설치시점에 수행하는 동재하시험이기 때문에 지반교란으로 주면마찰력이 과소평가된다. 반면에, 재항타시험은 말뚝 설치 후 일정시간이 경과하여 주변 지반이 강도를 회복한 후에 수행된다. 일반적으로, 주면마찰력이 회복된 후에 수행하는 재항타 시험에서는 재하용량의 한계 때문에 극한 지지력을 확인하기 어렵다. 결국, 동재하 시험에서 활용할 수 있는 분석자료는 초기항타에서 얻어진 선단지지력이기 때문이다.

본 연구에서는 총 172본의 PHC 항타말뚝에 대하여 동재하시험을 수행하였다. 총 172본 중 105본은 외경 0.5m (두께 80mm , B형식)의 말뚝이며, 나머지 67본은 외경 0.6m (두께 90mm , B형식)의 말뚝이다. 항타에 이용된 해머는 램 중량 13ton 의 유압해머(모델명 DKH-13)를 이용하였다. 말뚝은 연약 점토층 하부에 위치한 $32\text{m} \sim 53\text{m}$ 깊이에 분포하는 단단한 모래층까지 항타 근입되었으며, 평균 근입깊이는 약 39m 이었다. 특히, 동재하시험에 의한 말뚝 건진도를 분석한 결과, 항타 시에 말뚝체

에 발생한 압축 및 인장응력에 대하여 말뚝 손상이 발생하지 않았음을 확인하였다.

동재하 시험에서 측정된 자료를 이용하여 CAPWAP 분석(CAPWAP Wave Analysis Program)을 실시하여 선단지지력과 주변마찰력을 평가하였다. 최근 CAPWAP 분석에 의한 지지력은 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다. 즉, Links와 Rausche(2004) 등은 CAPWAP 분석과 정재하 시험에 의한 지지력 사이에 평균 98%의 신뢰도가 있다고 보고하고 있다. 그러나 동재하 시험의 신뢰성은 대상지층 특성을 고려한 입력값의 결정과 시험자에 의해 영향을 크게 받는다. 그러므로 본 연구에서는 1개의 말뚝을 선정하여 동재하시험과 정재하시험을 수행하였으며, 그들에 의한 지지력을 서로 비교하여 CAPWAP 분석의 신뢰성을 분석하였다.

시험은 동일현장에서 수행되었으며, PHC 말뚝의 제원은 외경 0.5m, 두께 80mm, 그리고 B형식(인장응력 = 80MPa)이다. 본 재하시험의 수행 및 분석에 관한 내용은 김성렬 등(2008)에 의하여 상세히 기술하고 있다. 정재하 시험은 말뚝선단에 O-cell을 설치하는 양방향 재하 시험이며, 동재하 시험은 말뚝을 설치하는 시점에 실시한 EOID의 결과이다. 양방향 재하 시험 결과 주변마찰력과 선단지지력이 서로 균형을 이루어 각각의 극한지지력을 확인할 수 있었으며 잔류하중을 고려한 보정을 수행하여 최종적으로 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림을 보면, CAPWAP 분석으로 얻어진 주변마찰력

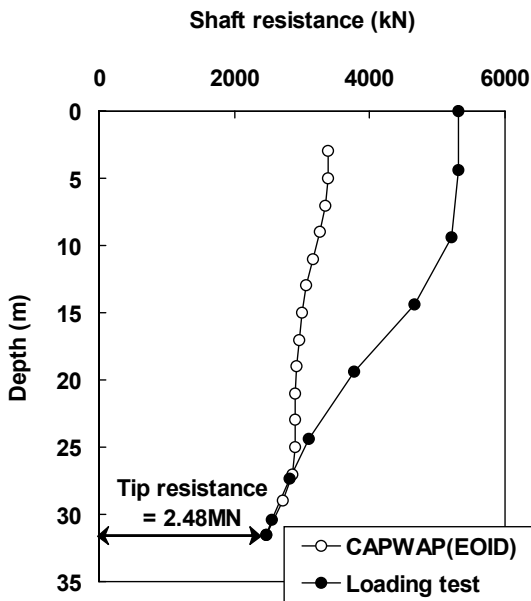


그림 3. 양방향 재하시험과 CAPWAP 지지력의 비교(김성렬 등, 2008)

과 선단지지력은 각각 913kN과 2480kN으로 나타났다. CAPWAP 분석의 주변마찰력은 항타 중의 지반교란에 의해 정재하시험으로 결정된 값인 2830kN의 약 1/3로 나타났다. 그러나 CAPWAP 선단지지력은 정재하시험에서 선단침하량 10mm(=0.02D)에 해당하는 값인 2.48MN과 동일한 것으로 나타나, 본 동재하 시험으로 산정된 선단지지력 값은 신뢰성이 높다는 것을 확인하였다.

4. 적용성 분석방법

4.1 자료의 선정 및 보정방법

분석결과의 신뢰성을 향상시키기 위하여 다음과 같이 4가지 단계를 순서대로 거쳐서 자료(CPT 및 동재하시험)를 주의 깊게 선정하였다.

(1) 1단계: CPT 시험위치와 말뚝시공 위치의 거리 분석

CPT 시험위치와 말뚝시공 위치가 멀어질수록 지층변화에 의해 CPT 결과와 동재하시험 결과의 상관성이 감소한다. 그림 4에서는 CPT와 말뚝 사이의 거리를 나타낸 것으로 대부분의 말뚝이 40m 이내에 위치하였다. 40m 이상인 경우에는 지층변화에 따른 영향이 크게 미칠 것으로 판단하여 분석자료에서 제외하였으며, 그 결과 지지력 예측값과 측정 지지력 사이의 상관성이 높아지는 것으로 나타났다. 그러므로, 172본의 말뚝자료 중 35본의 자료가 제거되고 137본이 선정되었다.

(2) 2단계: 말뚝의 근입깊이 보정

2단계에서는 CPT의 콘과 말뚝선단이 점토층 하부의

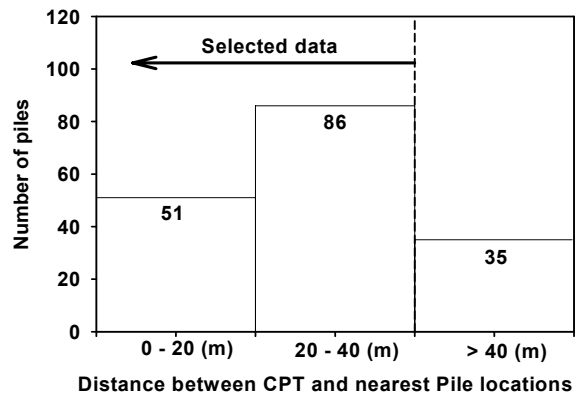


그림 4. CPT 위치와 말뚝시공 위치의 거리 분석을 통한 분석자료의 선정

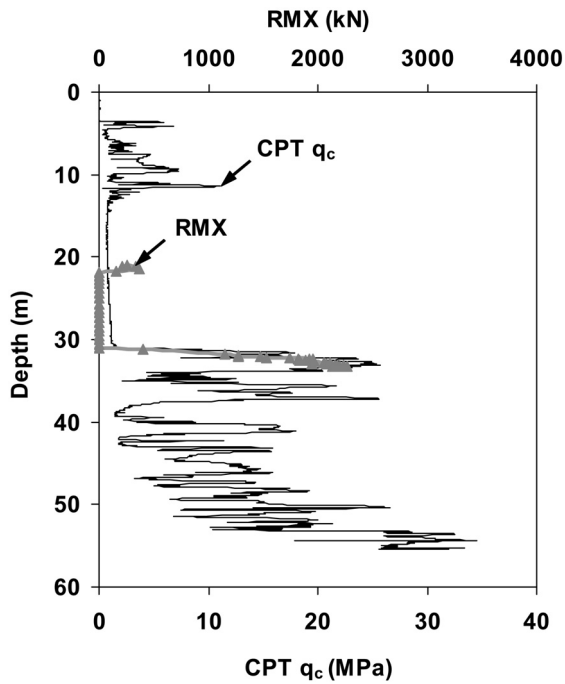


그림 5. RMX와 q_c 의 비교를 통한 말뚝근입 깊이의 보정

단단한 조밀층에 도달하면 q_c 값과 동재하 시험에서 얻어지는 RMX(= CASE 방법에 의해 구해지는 정적지지력) 값이 크게 증가하는 사실을 이용하여 말뚝의 근입깊이를 보정하였다. 그림 5에서는 RMX값과 q_c 값이 증가하기 시작하는 깊이가 서로 일치되도록 말뚝의 근입깊이를 보정한 사례를 보여주고 있다. 이와 같이 1단계에서 선정된 137본의 말뚝에 대하여 2단계 보정을 실시한 결과, 보정 후 지지력 예측값과 동재하시험의 측정 지지력 사이의 상관성이 크게 높아지는 것으로 나타났다.

(3) 3단계: 영향범위에서의 지층 변화 분석

말뚝 선단지지력은 선단 부근의 지층 두께 변화에 큰 영향을 받는다. 그러므로, 3단계에서는 말뚝 선단부근에서 지층두께의 변화가 큰 자료는 분석에서 제외하였다. 이를 위하여, 우선 CPT 결과를 Robertson & Campanella 방법(1988)에 적용하여 지반분류를 수행하였다. 다음으로, 지반분류에 근거하여 얻어진 세부지층의 두께를 상용 프로그램(Rockware Inc., 2006)에 입력하여 3차원적으로 지층 변화에 대한 정보를 구축하였다(그림 6). 그리고, 말뚝선단부의 영향범위 내에서 말뚝과 CPT 위치에서의 지층두께 변화가 큰 자료(지층두께 변화>0.2D)는 분석에서 제외하였다. 그 결과, 3단계 분석을 통하여 총 134본의 말뚝자료가 선정되었다. 그런데, 선정된 말뚝 중에는 동일한 말뚝의 2~3 깊이에서 선단지지력이 산

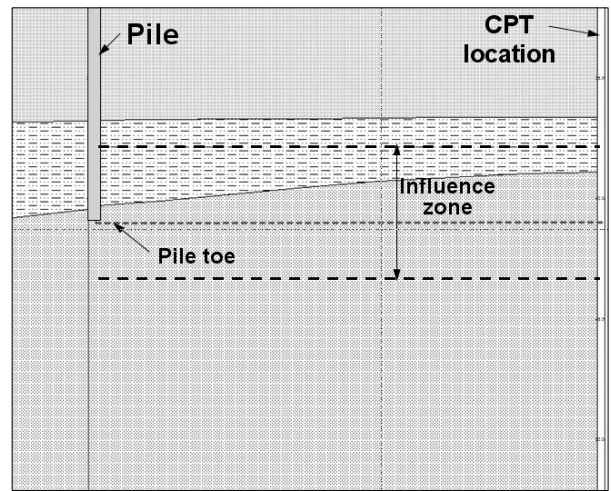


그림 6. 지층 두께변화를 고려한 분석자료의 선정

정된 자료들이 포함되어 있으므로 총 분석자료의 수는 154개가 되었다.

(4) 4단계: 통계적 처리

4단계에서는 CAPWAP 산정 지지력('Q_m'으로 표시)과 지지력 공식에 의한 예측지지력('Q_p'로 표시)을 산정한 후, (Q_p/Q_m)의 평균값과의 차이가 표준편차의 2배 이상인 자료를 분석에서 제외하였다.

Briaud & Tucker(1988)의 연구결과에 따르면, (Q_p/Q_m)값의 분포는 평균값에 대하여 비대칭이며 log-normal 분포형태인 것으로 나타났다. 그러므로, 본 연구에서는 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 (Q_p/Q_m)의 log값에 대한 평균값 \bar{x} 와 표준편차 s 값을 산정한 후, 식 (3)을 적용하여 평균값 \bar{x} 와의 오차가 표준편차 s 의 2배 이내인 자료를 분석에 이용하였다. 그런데, 각 CPT 공식에 의한 예측지지력이 다르기 때문에 각 방법별로 분석에 이용된 자료의 수는 143~150개로 변하였다.

$$\bar{x} = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$s = \exp \left(\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{x_i}{\bar{x}} \right) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\bar{x}}{s^2} \leq \left(\frac{Q_p}{Q_m} \right)_i \leq \bar{x} \cdot s^2 \quad (3)$$

여기서, $\bar{x} = \ln(Q_p/Q_m)$ 에 대한 평균값
 $s = \ln(Q_p/Q_m)$ 에 대한 표준편차

Q_p = CPT 공식으로 예측된 지지력
 Q_m = CAPWAP 분석에서 산정된 지지력
 n = 자료의 개수

을 각각 P_{50} 과 P_{90} 으로 정의한 후, P_{50} 값이 1에 가까울수록, P_{90} 과 P_{50} 의 차이가 작을수록 순위가 높음

4.2 분석방법

본 연구에서는 각각의 CPT-지지력 공식의 적합성을 규명하기 위하여 Abu-Farsakh 등(2004)과 유사한 분석 방법을 적용하기로 한다. 그들의 방법은 식 (4)에서와 같은 순위 계산 방법이다. 즉, 식 (4)에서 RI(Rank Index)값은 아래의 R1, R2, R3 및 R4의 합으로 얻어지며, RI값이 작을수록 그 방법의 적용성이 높다는 것을 의미한다.

$$RI = R1 + R2 + R3 + R4 \quad (4)$$

여기서, R1 = Q_m 와 Q_p 를 각각 x 및 y축으로 나타내어 추세선의 기울기 및 상관계수(R^2)값을 구한 후, 순위를 결정. 기울기가 1에 가까울수록, 상관계수 값이 클수록 순위가 높음
 R2 = (Q_p/Q_m) 값의 산술평균(μ) 및 표준편차(σ)에 의한 순위. 산술평균이 1에 가까울수록, 표준편차가 작을수록 순위가 높음
 R3 = (Q_p/Q_m) 값의 log-normal 분포와 히스토그램에서 $0.8 \leq (Q_p/Q_m) \leq 1.2$ 범위에 속하는 비율에 의한 순위. 비율이 높을수록 순위가 높음
 R4 = (Q_p/Q_m) 값의 누적비율을 이용한 순위. 누적비율 50%와 90%에 해당하는 (Q_p/Q_m) 값

5. 적용성 평가를 위한 분석결과

5.1 각 기준별의 분석

(1) R1 기준(최적 추세곡선 기준)

첫 번째 기준 R1을 위하여 예측값(Q_p)과 측정값(Q_m)의 자료에 대한 최적 추세선의 기울기($=Q_{fit}/Q_m$; Q_{fit} 는 최적 추세선상의 값)와 상관계수(R^2)를 이용한다. 그림 7과 같이 각 방법에서 얻어진 예측 지지력을 x축의 값, CAPWAP 분석의 지지력을 y축의 값으로 하여 모든 경우에 대한 값들을 나타내었다. 그림에서 점선은 예측지지력과 CAPWAP 지지력이 같아지는 1:1 직선을 참고로 나타내었고, 실선은 최적 추세선이다. 이 추세선의 기울기가 1에 가까울수록 예측식의 신뢰도가 높아지게 된다. 상관계수(R^2)는 추세선에 대한 각 점들의 분산도를 나타내는 값으로서, 이 값이 클수록 예측식의 신뢰도가 높아진다. 추세선 기울기와 상관계수에 의한 순위는 표 2에서 각각 A와 B로 정의하였다.

추세선 기울기(Q_{fit}/Q_m)에 의한 순위는 Aoki 방법(0.98), LCPC 방법(0.93), ICP 방법(0.92), Schmertmann 방법(0.91), 그리고 Eslami&Fellenius 방법(0.84) 등의 순서로 나타났다. 특히, Meyerhof 방법(1.65)에서는 지지력을 매우 과대평가하는 것으로 나타났으며, 그 외의 방법들은 모두

표 2. CPT 선단지지력 공식의 적용성 순위

No	공식	R1 기준					R2 기준					R3 기준					R4 기준					RI	순위
		Q_{fit}/Q_m	R^2	A	B	R1	μ	σ	C	D	R2	log-normal 비율	histogram 비율	E	F	R3	P_{50}	$P_{90}-P_{50}$	G	H	R4		
1	Aoki	0.98	0.63	1	1	1.0	1.00	0.21	1	5	3.0	65.34	66.67	1	1	1.0	0.98	0.32	1	5	3	8.0	1
2	LCPC	0.93	0.61	2	3	2.5	0.91	0.25	4	6	5.0	51.51	51.37	2	3	2.5	0.88	0.36	4	6	5	15.0	2
3	ICP	0.92	0.42	3	6	4.5	0.95	0.27	2	7	4.5	50.63	47.3	3	4	3.5	0.93	0.38	2	7	4.5	17.0	3
4	Philipponnat	0.82	0.60	6	4	5.0	0.84	0.19	6	3	4.5	48.68	54.05	4	2	3.0	0.82	0.30	6	4	5	17.5	4
5	Zhou	0.65	0.62	7	2	4.5	0.68	0.12	7	2	4.5	16.89	16.67	8	8	8.0	0.67	0.18	7	2	4.5	21.5	5
6	Schmertmann	0.91	0.33	4	7	5.5	0.94	0.31	3	8	5.5	42.57	43.24	5	5	5.0	0.91	0.46	3	8	5.5	21.5	5
7	Eslami & Fellenius	0.84	0.20	5	10	7.5	0.89	0.37	5	9	7.0	33.34	35.14	6	6	6.0	0.87	0.54	5	9	7	27.5	7
8	Penpile	0.31	0.50	10	5	7.5	0.31	0.10	10	1	5.5	0.18	0.00	10	10	10.0	0.31	0.14	10	1	5.5	28.5	8
9	UWA	0.55	0.31	8	8	8.0	0.57	0.20	9	4	6.5	12.56	12.84	9	9	9.0	0.55	0.29	9	3	6	29.5	9
10	Meyerhof	1.65	0.21	9	9	9.0	1.40	0.72	8	10	9.0	29.92	18.88	7	7	7.0	1.43	0.98	8	10	9	34.0	10

여기서, $RI=R1+R2+R3+R4$; $R1=(A+B)/2$; $R2=(C+D)/2$; $R3=(E+F)/2$; $R4=(G+H)/2$; R^2 =상관계수; μ , σ = 각각 (Q_p/Q_m) 값의 평균과 표준편차; log-normal 및 histogram 비율 = 각각 (Q_p/Q_m) 값의 log-normal분포와 히스토그램에서 $0.8 < (Q_p/Q_m) < 1.2$ 에 속하는 구간의 면적비율; P_{50} 과 P_{90} = 각각 누적확률 50%와 90%에 해당하는 (Q_p/Q_m) 값.

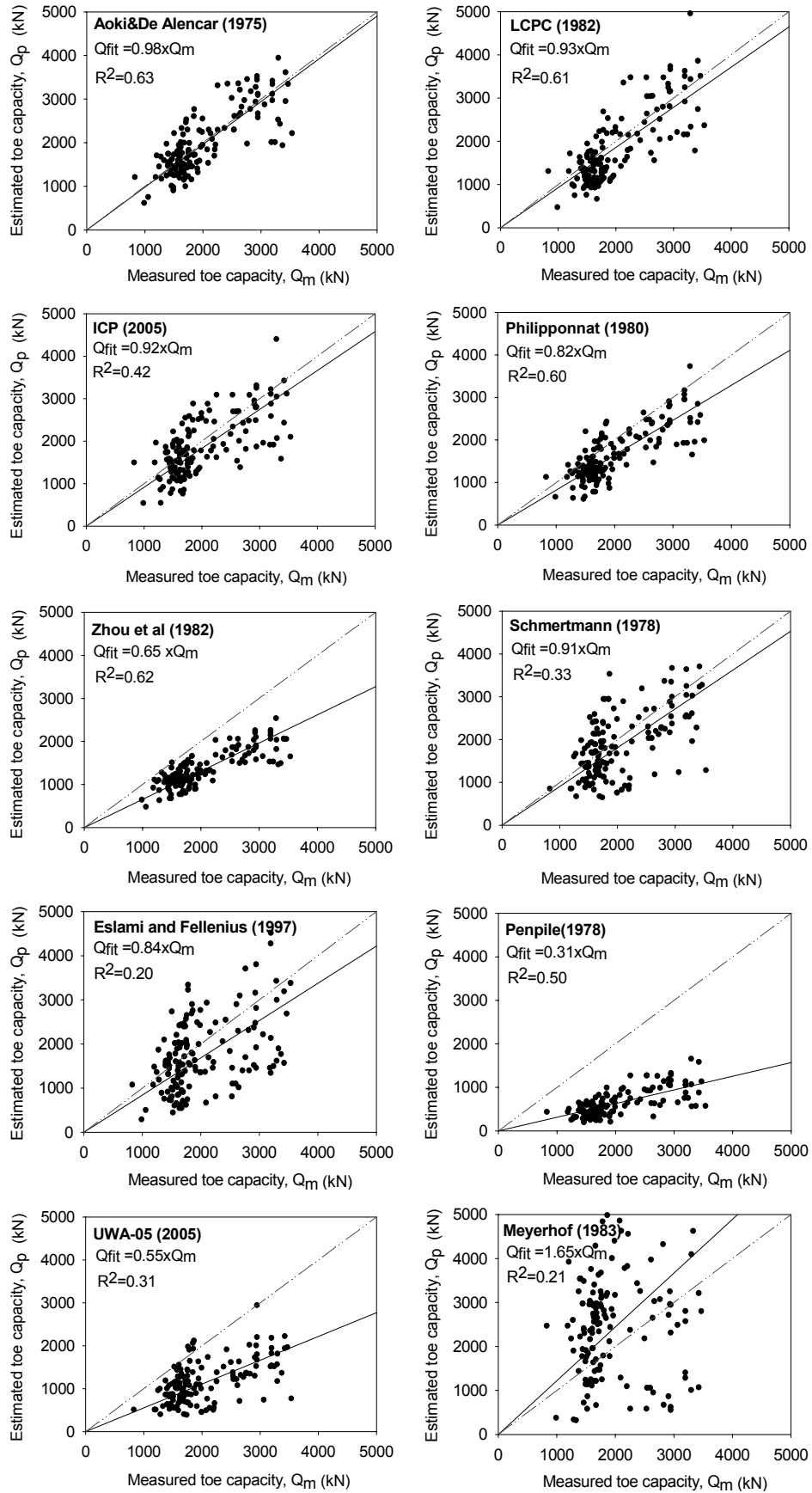


그림 7. R1 기준 - Q_m 값과 Q_p 값에 대한 추세선 비교

지지력을 측정값보다 작게 평가하였다. 또한, Zhou 방법, UWA 방법, Penpile 방법의 (Q_p/Q_m)값은 각각 0.64, 0.55 및 0.31으로서 지지력을 매우 과소평가하였다.

상관계수(R^2)에 의한 순위는 Aoki 방법(0.63), Zhou 방법(0.62), LCPC 방법(0.61), Philipponnat 방법(0.60), 그리고 Penpile 방법(0.50) 등의 순서로 나타났다. Zhou 방법의 경우 추세선의 기울기는 작았으나 상관계수에 의한 순위가 2위로 나타나 적절한 보정절차가 적용되면 적용성이 높아질 것으로 판단된다.

(2) R2 기준(산술평균 및 표준편차 기준)

R2기준은 (Q_p/Q_m) 비에 대한 산술평균(μ) 및 표준편차(σ)에 의한 순위 판정 방법으로서 산술평균값이 1에 가까울수록, 표준편차값이 작을수록 순위가 높아진다. 산술평균과 표준편차에 의한 순위는 표 2에서 각각 C와 D로 정의하였다.

산술평균(μ)에 의한 순위는 Aoki 방법(1.00), ICP 방법(0.95), Schmertmann 방법(0.94), LCPC 방법(0.91) 그리고 Eslami&Fellenius 방법(0.89) 등의 순서로 나타났다. Meyerhof 방법은 평균값이 1.40으로서 지지력을 약 40% 과대평가하였으며, 나머지 방법들은 모두 지지력을 작게 평가하는 것으로 나타났다. 표준편차(σ)에 의한 순위는 Penpile 방법(0.10), Zhou 방법(0.12), Philipponnat 방법(0.19), UWA 방법(0.20), 그리고 Aoki 방법(0.21) 등의 순서로 나타났다.

(3) R3 기준(log-normal 분포와 히스토그램 기준)

R3 기준은 (Q_p/Q_m) 값의 log-normal 분포와 히스토그램을 이용한다. 그림 8에서와 같이 (Q_p/Q_m)의 비율을 x축, (Q_p/Q_m)의 밀도값을 y축으로 나타낸다. 이 log-normal 분포와 히스토그램에서 (Q_p/Q_m)값이 0.8~1.2에 속하는 구간의 면적 비율을 계산한다. 이 비율이 높으면 예측값이 측정값 주변에 분포하는 것이므로 그 방법의 적용성이 높다는 것을 의미한다. log-normal 분포곡선은 식 (5)의 확률밀도함수를 적용하여 작성하였는데, 이 때 이용되는 표준편차 및 평균값은 각각 식 (1)과 (2)로부터 계산하였다. log-normal 분포와 히스토그램에 의한 순위는 표 2에서 각각 E와 F로 정의하였다.

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot s \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \bar{x}}{s} \right)^2 \right] \quad (5)$$

여기서, $x = (Q_p/Q_m)$

$\bar{x} = \ln(Q_p/Q_m)$ 값의 평균, 식 (1)로 계산됨

$s = \ln(Q_p/Q_m)$ 값의 표준편차, 식 (2)로 계산됨

log-normal 분포에 의한 비율의 순위는 Aoki 방법(65%), LCPC 방법(51%), ICP 방법(50%), Philipponnat 방법(48%), 그리고 Schmertmann 방법(42%) 등의 순서로 나타났다. 히스토그램에 의한 순위는 Aoki 방법(66%), Philipponnat 방법(54%), LCPC 방법(51%), ICP 방법(47%), 그리고 Schmertmann 방법(43%) 등의 순서로 나타났다. 특히, Zhou 방법, Penpile 방법, UWA 방법, Meyerhof 방법은 추세선 및 산술평균 기준에서 예측값과 측정값의 차이가 크기 때문에 비율이 20%이하로 나타났다.

(4) R4 기준(누적확률 기준)

R4기준은 Long & Wysockey(1999)가 제안한 방법으로서, (Q_p/Q_m)값을 작은 값부터 큰 값 순서대로 나열한 후 식 (6)을 이용하여 누적확률(P)를 계산한다. 그리고, 그림 9에서와 같이 누적확률이 50%와 90%에 해당하는 (Q_p/Q_m)값을 각각 P_{50} 과 P_{90} 으로 정의한다. P_{50} 값이 1.0에 가까울수록 예측값과 측정값의 누적확률 중앙값이 비슷한 것을 의미하므로 순위가 높아지고, P_{50} 과 P_{90} 값의 차이가 작을수록 분산이 작을 것을 의미하므로 순위가 높아진다. P_{50} 과 ($P_{90}-P_{50}$)차이에 의한 순위를 표 2에서 각각 G와 H로 정의하였다.

$$P = \frac{i}{(n+1)} \quad (6)$$

여기서, P = 누적확률

i = (Q_p/Q_m)값을 작은 값부터 큰 값 순서대로 나열하였을 때 자료의 순위

n = 전체자료의 개수

P_{50} 기준에 의한 순위는 Aoki 방법(0.98), ICP 방법(0.93), Schmertmann 방법(0.91), LCPC 방법(0.88), 그리고 Eslami&Fellenius 방법(0.87) 등의 순서로 나타났다. P_{50} 과 P_{90} 차이($P_{90}-P_{50}$)에 의한 순위는 Penpile 방법(0.14), Zhou 방법(0.18), UWA 방법(0.29), Philipponnat 방법(0.30), 그리고 Aoki 방법(0.32) 등의 순서로 나타났다.

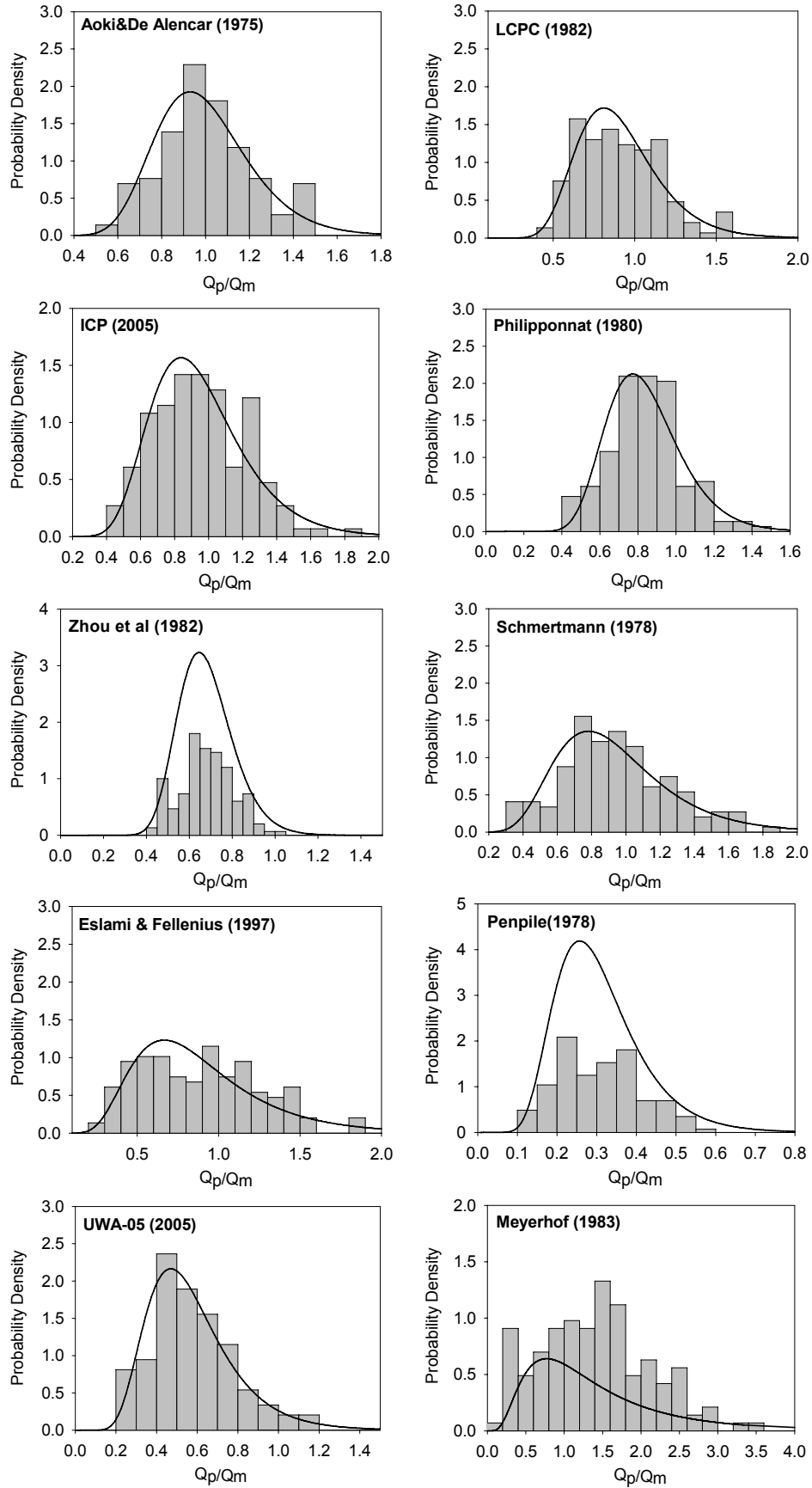


그림 8. R3기준 - (Q_p/Q_m)값에 대한 log-normal 분포 및 히스토그램 비교

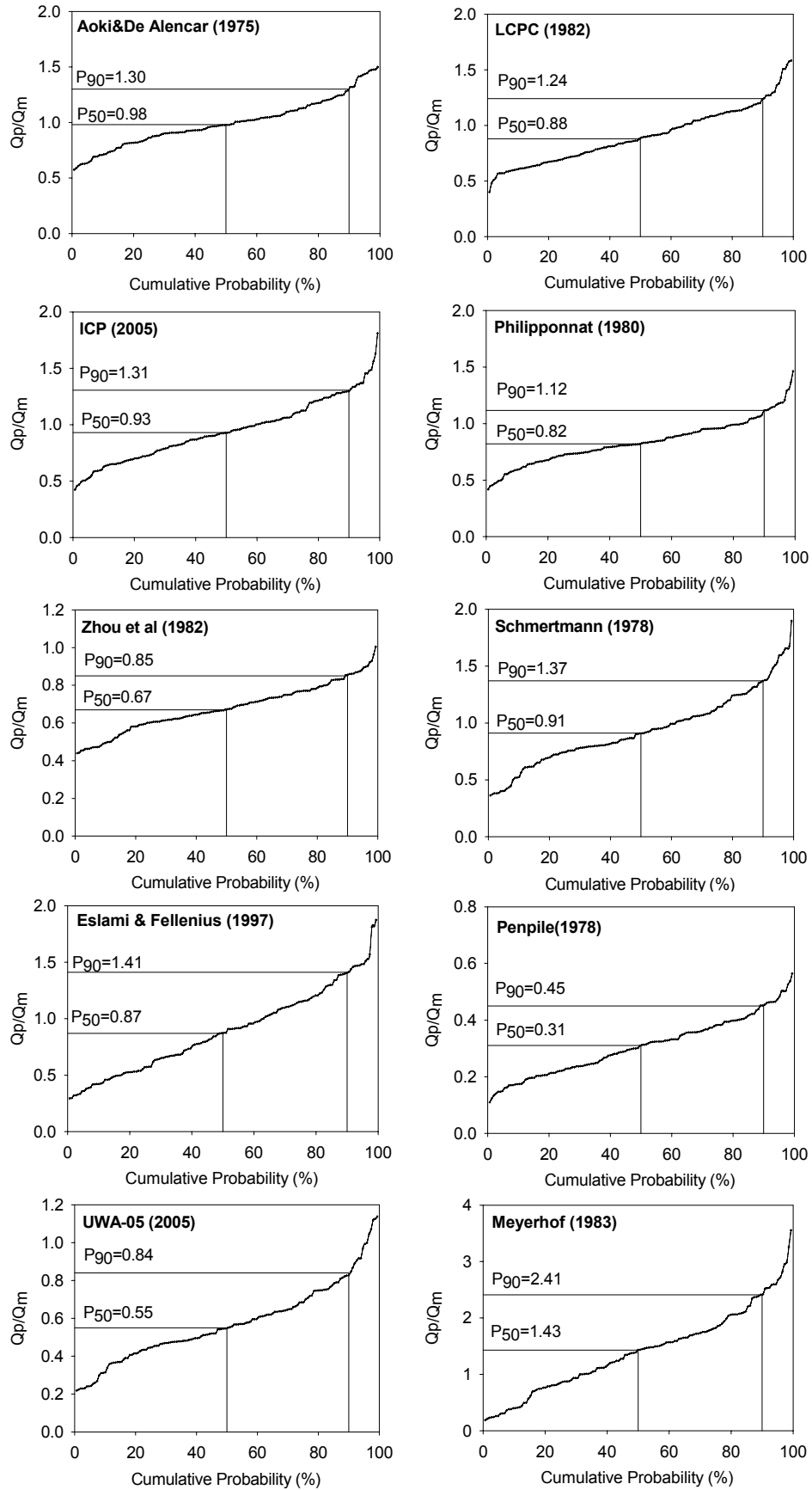


그림 9. R4기준 - 누적확률값의 비교

5.2 종합분석

표 2는 5.1절에서 얻어진 결과를 종합적으로 정리한 표이다. 이 표에서 보면, RI값이 작은 순서로서 Aoki 방법, LCPC 방법, ICP 방법, Phillipponat 방법, Zhou 방법 및 Schmertmann 방법 등의 순서로 적용성이 높은 것으로 나타났다.

상기의 결과를 해외의 적용 사례와 비교하는 것은 흥미로운 것이다. Abu-Farsakh 등(2004)은 미국 Louisiana 지역에 분포하는 점토 또는 점토-모래 지반에 항타근입된 마찰말뚝을 대상으로 총 10가지 CPT 지지력 공식의 적용성을 분석하였다. 이들이 적용한 지지력 공식들 중에서 5가지의 방법은 본 연구에서 동일하게 적용하였는데, 상기의 결과와는 약간 다르게 LCPC 방법, Phillipponat 방법, Schmertmann 방법, Aoki 방법, Penpile 방법의 순서로 적용성이 높은 것으로 나타났다. 이러한 차이가 발생한 이유는 Abu-Farshkh 등(2004)이 주로 점토지반에 근입되는 마찰말뚝을 대상으로 하였으며, 주변 및 선단지지력을 더한 전체 지지력을 대상으로 분석한데 비하여, 본 연구의 경우 선단지지력만을 대상으로 말뚝선단부가 단단한 모래층에 근입된 경우를 분석하였기 때문으로 판단된다. 또한, 김지환 등(2007)의 연구결과에 따르면, 선단지지력에 대하여 Aoki와 LCPC 방법이 측정 지지력과 유사한 값을 보여주어 우수한 방법으로 판정되었다.

이와 같이, 국내외에서 수행된 연구 결과에서 보면, LCPC 방법 및 Aoki 방법의 적용성이 공통적으로 우수하다는 것을 알 수 있다. 신뢰성 있는 결론을 위하여 더 많은 사례연구가 물론 수행되어야 하겠지만, 국내의 여러 현장에 상기의 방법을 적용하도록 권장할 수 있을 것이다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 부산 낙동강 하구 대심도 연약지반에 시공된 PHC 항타말뚝을 대상으로 CPT 결과를 이용하는 선단지지력 공식의 적용성을 분석하였다. 본 연구를 위하여 총 82개소의 CPT 자료 및 172본의 PHC 항타말뚝에 대한 동재하시험 자료를 수집하여 분석하였다. 분석결과의 신뢰성을 높이기 위하여 CPT 위치와 PHC 말뚝시공 위치간의 거리분석, CPT q_c 와 동재하 시험의 RMX 값을 이용한 말뚝 근입깊이 보정, 지층 두께변화를 고려한 자료 선정, 그리고 통계기법을 활용한 자료 선정과

같이 4단계의 분석자료 선정절차를 적용하였다. 다음 단계로서, 이와 같이 선정된 자료를 총 10가지의 CPT-선단 지지력 공식에 적용하였으며, Abu-Farsakh 등(2004) 등이 제시한 4가지 기준을 이용하여 그 공식의 적용성을 분석하였다.

상기의 분석으로 얻어진 결론으로서, CPT 선단지지력 공식의 적용성은 Aoki 방법, LCPC 방법, ICP 방법, Phillipponat 방법, 그리고 Zhou 방법 및 Schmertmann 방법 등의 순서로 높은 것으로 나타났다. Meyerhof 방법은 지지력을 평균적으로 40% 정도 과대평가하는 것으로 나타났으며, Meyerhof 방법을 제외한 나머지 방법들은 모두 지지력을 작게 평가하는 것으로 나타났다. Zhou 방법의 경우 측정값에 비하여 지지력을 약 30% 이상 과소평가하지만 측정값에 대한 예측값의 분산도가 작은 것으로 나타나 적절한 보정계수가 도입된다면 적용성이 향상될 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구와 기존의 연구결과를 비교하면, 국내 해안 매립지역 등 유사한 지층조건을 가진 곳에서 시공되는 PHC 항타말뚝의 선단지지력 산정에 LCPC 및 Aoki 방법을 적용하도록 추천할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-D00604) 및 한국과학재단의 국가지정연구실사업의 지원(No. ROA-2008-000-20076-0)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. 김성렬, 정성교, 이봉열 (2008), “잔류하중을 고려한 장대 PHC 말뚝의 양방향 재하시험 결과분석”, *한국 지반공학회 논문집*, 24(6), pp.85-93.
2. 김지환, 김민기, 이준환 (2007), “CPT 결과를 이용한 말뚝지지력 예측법의 평가 및 신뢰성 분석”, *대한토목학회 논문집*, 27(1C), pp.1-9.
3. 윤길립 (1997), “CPT를 이용한 말뚝지지력 산정식의 신뢰성”, *대한토목학회 논문집*, 17(III-1), pp.101-109.
4. Abu-Farsakh, M.Y. and Titi, H.H. (2004), “Assessment of Direct Cone Penetration Test Methods for Predicting the Ultimate Capacity of Friction Driven Piles”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.130, GT9, pp.935-944.
5. Aoki, N., and De Alencar, D. (1975), “An approximate method to estimate the bearing capacity of piles”, *Proc. 5th Pan-American Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Vol.1, pp.367-376.
6. Bustamante, M., and Gianselli, L. (1982), “Pile bearing capacity

- predictions by means of static penetrometer CPT”, *Proc., 2nd European Symp. on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, The Netherlands, Vol.2, pp.493-500.*
7. Briaud, J.-L., and Tucker, L. M. (1988), “Measured and predicted axial response of 98 piles”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(9), pp.984-1001.*
 8. Chung, S.G., Giao, P.H., Kim, G.J., and Leroueil, S. (2002), “Geotechnical properties of Pusanclays”, *Canadian Geotechnical Journal, 39(5), pp.1050-1060.*
 9. Chung, S.G., Ryu, C.K., Jo, K.Y. and Huh, D.Y. (2005), “Geological and geotechnical characteristics of marine clays at the Busan new port”, *Marine Georesources and Geotechnology, 23(3), pp. 235-251.*
 10. Chung, S.G., Kim, G.J., Kim, M.S. and Ryu, C.K.(2007), “Undrained shear strength from field vane test on Busan clay”, *Marine Georesources and Geotechnology, 25(3) pp.167-179.*
 11. Clisby, M. B., Scholtes, R. M., Corey, M. W., Cole, H. A., Teng, P., and Webb, J. D. (1978), “An evaluation of pile bearing capacities”, Final Report, Mississippi State Highway Department, Volume 1.
 12. Eslami, A., and Fellenius, B.H. (1997), “Pile capacity by direct CPT and CPTU methods applied to 102 case histories”, *Canadian Geotechnical Journal, 34(6), pp.886-904.*
 13. Jardine, R.J., Chow, F.C., Overy, R.F., Standing, J.R. (2005), “ICP design methods for driven piles in sands and clays”, Thomas Telford, London.
 14. Lehane, B.M., Schneider, J.A., and Xu, X. (2005), “CPT based design of driven piles in sand for offshore structures”, UWA Report, GEO: 05345, University of Western Australia, Australia.
 15. Likins, G.E., Rausche, F., Thendean, G. and Svinkin, M. (1996), “CAPWAP Correlation Studies”, *Proc. of the 5th Int'l Conf. on the Application of Stresswave Theory to Piles, University of Florida, Orlando Florida USA.*
 16. Likins, G.E., and Rausche, F. (2004), “Correlation of CAPWAP with Static Load Tests”, *Proc. of 7th Int'l Conf. on the Application of Stresswave Theory to Piles, Petaling Jaya, Selangor, Malaysia. pp. 153-165.*
 17. Long, J. H., and Wysockey, M. H. (1999), “Accuracy of methods for predicting axial capacity of deep foundations”, *Proc., OTRC '99 Conf.: Analysis, Design, Construction, and Testing of Deep Foundation, GSP No. 88, ASCE, Reston, Va., pp.190-195.*
 18. Meyerhof, G. G. (1983), “Scale effects of pile capacity”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 108(3), pp.195-228.*
 19. Philipponnat, G. (1980), “Methode pratique de calcul d'un pieu isole a l'aide du penetrometre statique”, *Rev. Fr. Geotech., Vol.10, pp.55-64.*
 20. Robertson, P.K. and Campanella, R.G. (1988), “Guidelines for Use, Interpretation and Application of the CPT and CPTU”, UBC, Soil Mechanics Series No. 105, Civil Eng. Dept., Vancouver, B.C., V6T 1W5, Canada, pp.197.
 21. RockWare Inc. (2006), Rockworks program
 22. Schmertmann, J.H. (1978), “Guidelines for cone penetration test, performance and design”, Report No. FHWA-TS-78-209, US. Department of Transportation, Washington, D.C., pp.145.
 23. Zhou, J., Xie, Y., Zuo, Z.S., Luo, M.Y. and Tang, X.J. (1982), “Prediction of limit load of driven pile by CPT”, *Proc. of the 2nd European Symp. on Penetration Testing, Amsterdam, The Netherlands, Vol.2, pp.957-961.*

(접수일자 2009. 10. 6, 심사완료일 2009. 11. 20)