

## 타입강관말뚝의 토질별 하중전이곡선 도출에 관한 연구

### A Study on the Development of Load Transfer Curves of the Driven Steel Pipe Piles by Soil

임 중 석<sup>1</sup> Lim, Jong-Seok

최 용 규<sup>2</sup> Choi, Yong-Kyu

심 중 선<sup>3</sup> Sim, Jong-Sun

박 중 회<sup>3</sup> Park, Jong-Hee

#### Abstract

As computational technologies have been developed, the load transfer analysis method using load transfer curves is widely performed. Now the load transfer analysis methods are widely used in our country. But most of the curves using in the analysis have been developed in foreign countries. In this study we gathered the data of in situ pile load tests on domestic nine sites in order to derive load transfer curves of driven steel pipe piles. Then we derived average lines of  $f/f_{max} - w/D$  curves for sandy and clayey soils respectively, which are expressed by hyperbolic function. And the results using these curves and the results using TZPile 2.0 (Analysis program of pile) were compared and analyzed with the results of pile load tests on domestic 3 sites in order to ascertain the applicability of the curves. The results show that the load-settlement relations using the curves in this study are more similar to the measured data and more conservative than those using TZPile 2.0.

#### 요 지

전산기술의 발달과 더불어 좀 더 복잡하고 반복적인 계산을 쉽게 수행할 수 있게 됨으로써 하중전이곡선을 이용한 하중전해석법이 널리 이루어지고 있다. 현재 국내에서도 하중전해석법을 많이 사용하고 있다. 그러나 이러한 하중전해석법에서 사용되는 곡선들은 대부분 외국에서 개발된 곡선들로서 국내지반에서의 적용성 여부는 확실치 않다. 본 연구에서는 타입강관말뚝의 하중전이곡선을 도출하기 위하여 국내 9곳의 현장재하시험 데이터를 수집하였다. 이들을 분석하여 사질토와 점성토에 대하여 각각  $f/f_{max} - w/D$  곡선의 평균선을 구하였으며 각 곡선을 쌍곡선함수로 나타내었다. 그리고 이 곡선의 적용성을 알아보기 위하여 이 곡선을 이용한 결과와 말뚝해석 프로그램인 TZPILE 2.0을 이용한 결과를 국내 3현장의 재하시험결과와 비교분석하였다. 그 결과 일반적으로 본 연구의 결과를 적용하여 얻은 하중-침하량 관계가 기존의 TZPILE 2.0으로 얻은 관계보다 비교적 실측값에 가까운 경향을 보였으며 보수적으로 나타났다.

**Keywords :** End bearing capacity, Load transfer curve, Load transfer function, Side friction, Steel pipe pile

1 정회원, 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 교수 (Member, Prof. Major in Civil Eng., Division of Construction Eng., Collage of Eng., Mokpo National Univ., jslim@mokpo.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., KyungSung Univ.)

3 정회원, 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 석사과정 (Member, Graduate Student, Major in Civil Eng., Division of Construction Eng., Collage of Eng., Mokpo National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

말뚝의 설계에 있어서 하중-침하량 관계를 알아야 하는 경우가 대부분이다. 말뚝의 하중-침하량 관계는 현장 재하시험에 의해 가장 정확히 알 수 있다. 그러나 사정상 현장재하시험결과를 알 수 없을 경우에는 해석적으로 예측하여야 한다. 예측방법으로는 말뚝과 지반의 하중전이곡선을 이용하는 하중전이해석법이 많이 사용되고 있다.

하중전이해석법은 말뚝과 지반의 상대변위에 따라 결정된 주면마찰저항과 선단저항을 이용해서 단일말뚝의 하중-침하량 관계를 해석적으로 구하는 방법이다(Coyle and Reese, 1966 ; 土質工学會, 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. 이러한 지반스프링을 시험 등에 근거해 적절히 설정함으로써 극한상태에 이르기까지 단일말뚝의 하중-침하량 관계를 실제에 가깝게 표현할 수 있다.

하중전이해석법은 해석과정이 매우 간단하고 다층지반에 대한 적용이 용이하며 지금까지 제안된 여러 가지 하중전이곡선식을 효과적으로 사용할 수 있는 장점이 있어서 많이 사용되고 있다. 현재 국내에서는 외국에서 개발된 하중전이곡선을 이용한 컴퓨터프로그램을 사용하여 하중전이해석법을 적용하고 있다. 그러나 이 함수들이 국내지반에 적합한지에 대해 확실하지 않을 뿐 아니라 발표된 여러 곡선들 상호간의 차이도 크다.

본 연구에서는 타입강관말뚝에 적용할 수 있는 하중전이곡선을 도출하고자 하였다. 이 곡선은 유사한 지반 및 말뚝의 조건에 대한 기존의 재하시험결과에 근거해서 설정하는 것이 기본이다. 이를 위하여 국내 9곳에서 수행된 타입강관말뚝에 대한 하중전이를 측정된 현장 재하시험결과를 수집, 분석하였다. 하중전이곡선 중 선단지력에 관한 것은 자료가 미흡하여 수행하지 못하고 주면마찰력에 관한 것만 도출하였다. 도출된 주면마찰력 하중전이곡선의 적용성을 알아보기 위하여 국내 3개 지구에서 수행된 재하시험결과를 이 곡선을 이용한 결과와 말뚝해석 프로그램인 TZPILE 2.0을 이용한 결과와 비교, 분석하였다.

## 2. 문헌연구

### 2.1 최대주면마찰력 예측방법

하중전이해석법은 지반조사결과와 말뚝의 조건을 가지고 하중전이곡선을 이용하여 말뚝의 하중-침하량 관계를 예측하는 것이므로 지반조사결과로부터 하중전이곡선을 결정하여야 한다. 하중전이곡선의 결정을 위해서는 각 토층의 최대주면마찰력  $f_{max}$  를 예측해야 한다.  $f_{max}$  를 예측하는 방법은 여러 가지가 있는데 이 중 하나를 선택하여 사용하게 된다. 본 연구에서는  $f_{max}$  를 예측하는 기존의 방법들을 살펴보고 이들 방법을 이용하여 구한 값과 현장시험 결과를 비교하여 가장 정확한 방법을 선정하여 사용하기로 하였다.

$f_{max}$  는 지반의 여러 가지 물성값으로부터 구할 수 있으며 이 물성값에 따라 여러 가지 방법을 적용할 수 있다. 여기에서는 지반의 물성값 중 가장 많이 얻어지고 널리 사용되는 표준관입시험값  $N_{60}$  을 이용한 방법을 검토하였다.  $N_{60}$  값을 이용하여  $f_{max}$  를 구하는 방법으로서 사질토에서는 Meyerhof(1976), Decourt(1982), Briaud et al.(1985) 등의 방법을 검토하였고 점성토에서는 정역학적지력공식, Meyerhof(1976), Decourt(1982), Shioi and Fukui(1982), Briaud et al.(1985) 등의 방법을 검토하였다. 다음에 이들 방법에 대해 간단히 요약하였다.

#### 2.1.1 사질토

##### ① Meyerhof(1976)

$$f_{max} \text{ (kN/m}^2\text{)} = 2N_{60} \quad (1)$$

여기서,  $N_{60}$ : 표준관입시험값

##### ② Decourt(1982)

$$f_{max} \text{ (kN/m}^2\text{)} = 10 + 3.3N_{60} \quad (2)$$

##### ③ Briaud et al.(1985)

$$f_{max} \text{ (kN/m}^2\text{)} = 22.4N_{60}^{0.29} \quad (3)$$

#### 2.1.2 점성토

##### ① 정역학적지력공식

$$f_{max} \text{ (kN/m}^2\text{)} = c_u = \alpha c_u \quad (4)$$

여기서,  $c_a$  : 부착력(kN/m<sup>2</sup>)  
 $c_u$  : 비배수점착력(kN/m<sup>2</sup>)  
 $\alpha$  : 부착력계수

비배수점착력  $c_u$ 는 Hara et al.(1971)이 제안한 식을 적용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$c_u \text{ (kN/m}^2\text{)} = 29N_{60}^{0.72} \quad (5)$$

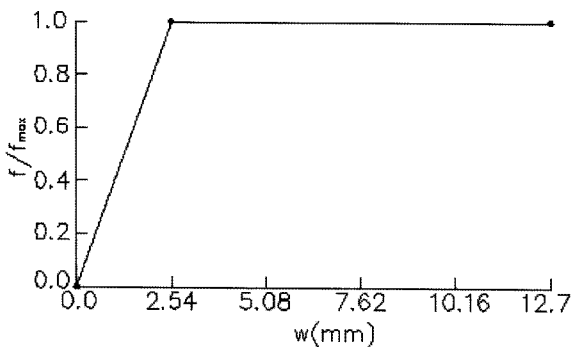
② Meyerhof(1976), Decourt(1982), Briaud et al.(1985) 사질토와 동일한 식을 사용한다.

③ Shioi and Fukui(1982)

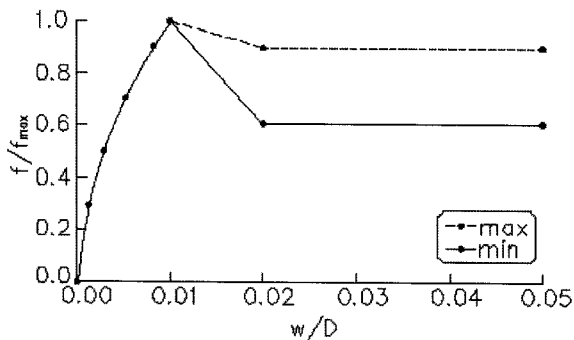
$$f_{\max} \text{ (kN/m}^2\text{)} = 10 N_{60} \quad (6)$$

## 2.2 주면하중전이곡선

주면하중전이곡선은 토질성상이나 말뚝종류, 말뚝의 시공법 등의 영향을 받는데, 분명하지는 않으며 또한 말뚝지름의 영향도 불명확하다. 따라서 주면마찰력-침하량 관계는 과거의 재하시험 결과를 토대로 경험적으로 설정되어 있다.



(a) 사질토



(b) 점성토

그림 1. API규준의 주면하중전이곡선

사질토에서의 하중전이곡선은 Coyle and Sulaiman(1967), Vijayvergiya(1977), Reese and O'Neill(1989), API규준(1993) 등의 곡선이 있고, 점성토에서의 하중전이곡선은 Coyle and Reese(1966), Reese and O'Neill(1989), API규준(1993) 등의 곡선이 있다. 이 밖에도 많은 하중전이곡선들이 발표되었으나 그들 중 API규준의 곡선만이 강관말뚝에 대한 것이고 나머지는 모두 현장타설말뚝을 대상으로 하여 구한 곡선들이다. 따라서 본 연구에서는 API규준의 곡선을 위주로 검토하였다.

API규준에 따른 사질토의 하중전이곡선은 그림 1(a)와 같고, 점성토의 하중전이곡선은 그림 1(b)와 같다. 그림에서  $f$ 는 주면마찰력,  $w$ 는 변위,  $D$ 는 말뚝의 지름이다.

## 3. 현장재하시험

### 3.1 지반 및 말뚝조건

현장재하시험은 6개 현장에서 9개의 말뚝에 대해 이루어졌다. 그림 2에는 지반조사 결과와 시험말뚝의 개요 및 센서의 위치 등을 보여주고 있다. 지반조사 결과는 말뚝과 가장 근접한 시추공에 대한 결과이다. 조사목적은 지지층의 확인에 있으므로 조사심도는 현장마다 다소 차이가 있다. 토층구분은 표준관입시험시의 표준관입값, 채취된 시료 등을 고려하여 흙의 공학적 분류 기준을 적용하였다. 표준관입시험은 KS F 2318 규정에 따랐으며 지반이 조밀하여 50회 타격에도 30cm 관입이 불가능한 경우에는 50회 타격에 대한 관입량을 기록하였다.  $N_{60}$ 은 표준관입값을 해머효율을 포함하여 룯드길이, 샘플러 종류, 공벽지름 등을 고려하여 보정한 값이다.

말뚝은 지름이 406mm, 508mm, 609mm의 3가지이며 모두 개단말뚝이다. 개단말뚝의 경우 폐색효과에 따라 지지거동이 달라질 수 있다. 개단말뚝의 경우 지지층으로 지름의 5배 이상 관입되면 폐색된 것으로 본다(한국지반공학회, 2003). 따라서 본 연구의 말뚝은 모두 폐색되어 폐단말뚝으로 거동할 것으로 보인다. 이 때 말뚝 내외벽에서 마찰력이 발휘되고 측정된 마찰력은 내외벽의 마찰력이 합쳐진 값으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 이를 구분하지 않고 합력을 주면마찰력으로 간주하였다. 엄밀히는 이 둘을 구분하여 별도로 분석하여야 하겠지만 종합적으로 마찰력이 발휘된다고 단순화하였다. 보다 엄밀한 해석은 별도의 연구로 이루어질 필요가 있을 것으로 보인다.

### 3.2 시험 및 분석 방법

시험은 하중전이를 측정하는 정재하시험으로 이루어졌다. 그림 2에서와 같이 시험시 말뚝부재에 발생하는 응력을 측정하기 위해서 센서를 설치하였다. 즉, 강관말뚝에 완전결선형 전기저항식 강관변형률계를 설치하였으며 설치위치와 수량은 그림 2에 나타낸 바와 같이 시

험말뚝의 길이와 지반조건 등을 감안하여 변화시켰다. 설치양상은 각 단면당 180° 방향으로 2개소로 하였다. 스트레인게이지를 강관 표면에 부착하여 완전결선회로를 구성하였고 그 위에 방수처리를 하였으며 외부의 충격에 대한 보호를 위하여 방충처리를 하였다. 그리고 항타로 인한 전선의 절단을 방지하기 위하여 전선 처리한 후 설치된 센서의 보호를 위해 보호용 채널을 용접하였다.

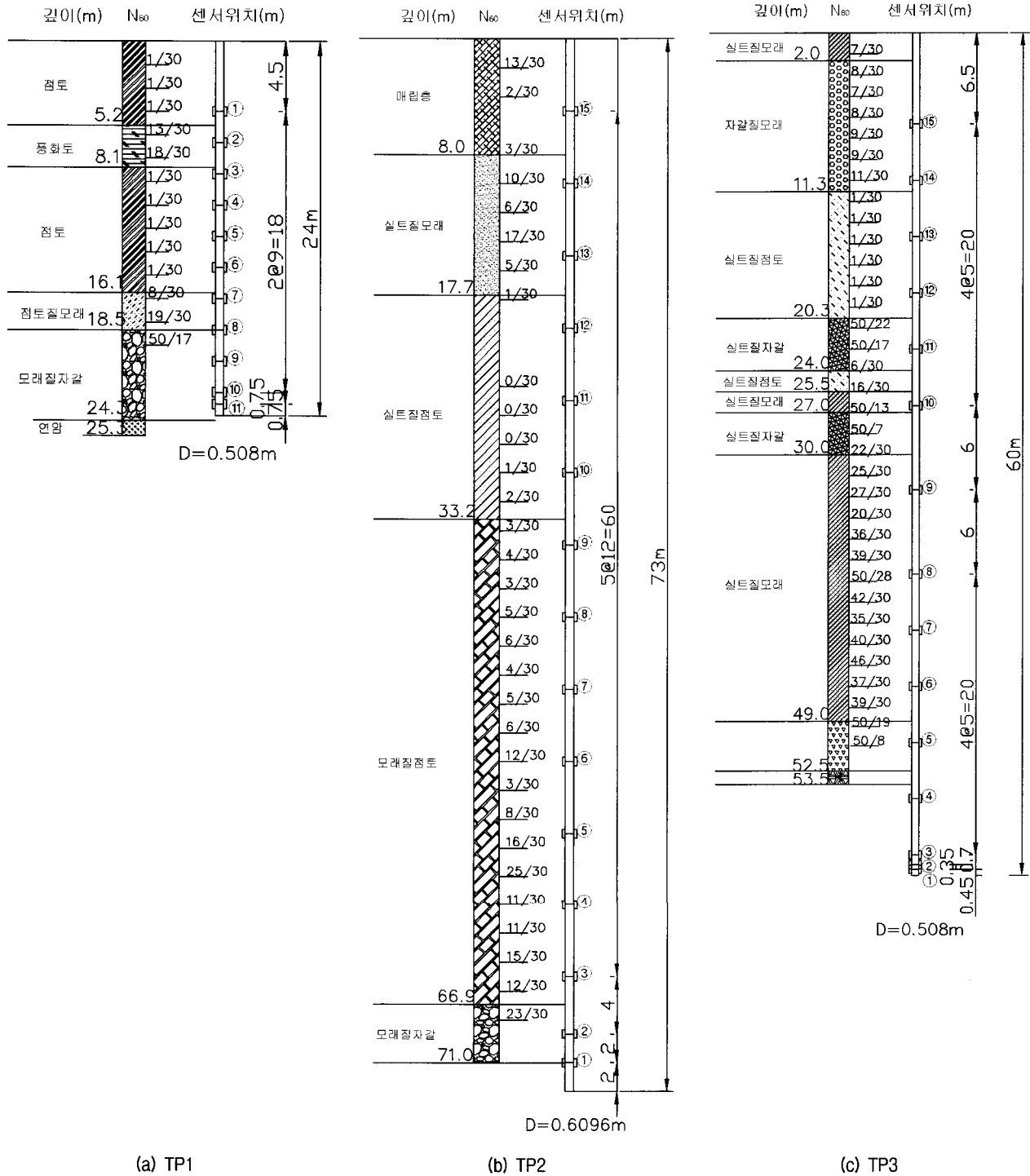
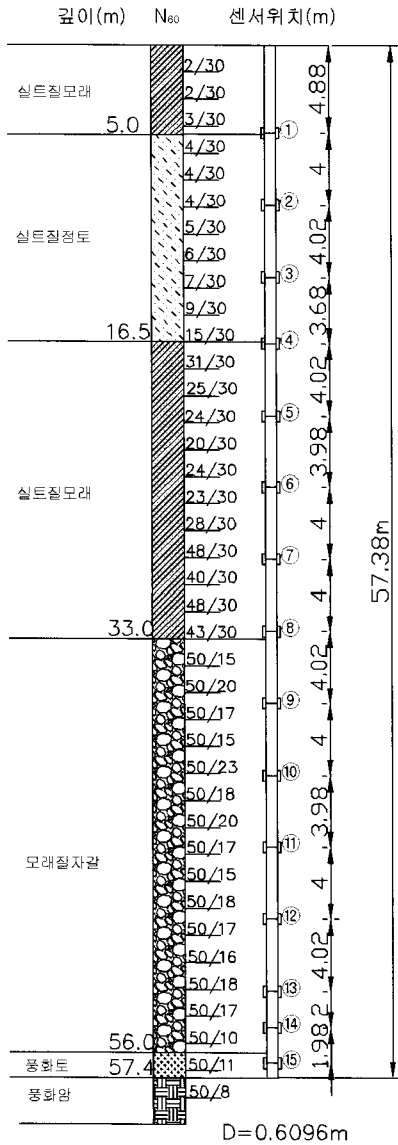
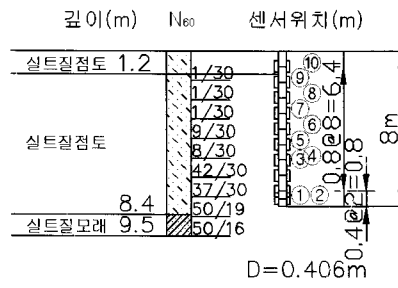


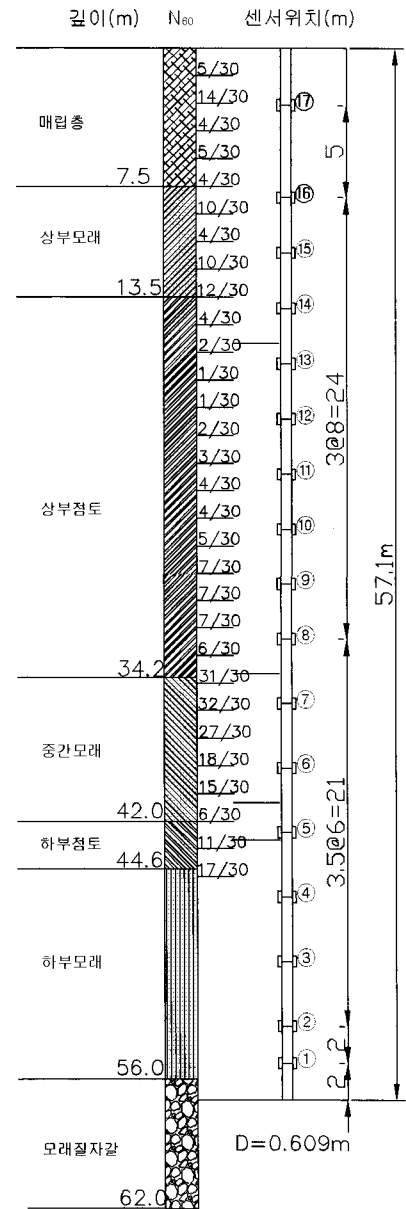
그림 2. 각 현장의 지반 및 말뚝조건



(d) TP4



(e) TP5



(f) TP6~9

그림 2. 각 현장의 지반 및 말뚝조건 (계속)

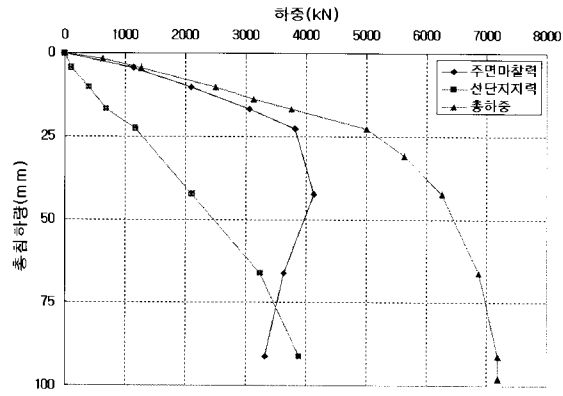
말뚝 정재하시험에서는 ASTM D1143-81에 규정된 완속재하방법 중 탄성침하량과 소성침하량을 측정할 수 있는 다주기(multy cycle) 방식에 의한 하중제어방식을 채택하였다. 각 재하단계별로 측정된 스트레인게이지 값으로부터 재료특성을 고려하여 해당 위치의 축하중을 구한다. 주면마찰력  $f$  는 측정된 깊이별 축하중 분포로부터 두 점 사이의 하중차이를 두 점 사이의 주면적으로 나누어 구한다. 이 때 말뚝두부의 침하량을 측정하고 스트레인게이지 값으로부터 말뚝의 깊이별 변위를 구하면 해당 위치의 침하량  $w$  를 구할 수 있다. 이와 같은 작업을 매 재하단계마다 수행하여 주면마찰력-침하

량 관계( $f-w$  곡선)를 구한다.

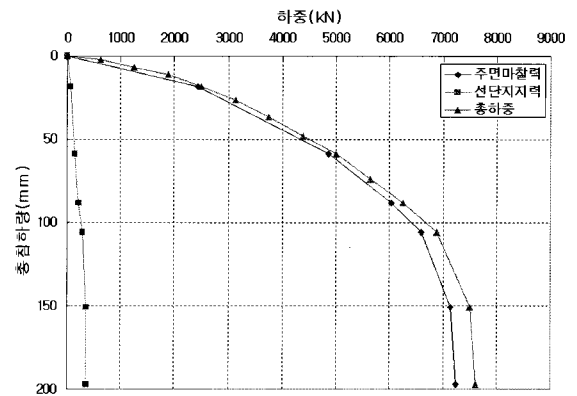
#### 4. 재하시험결과 및 분석

##### 4.1 정재하시험 결과

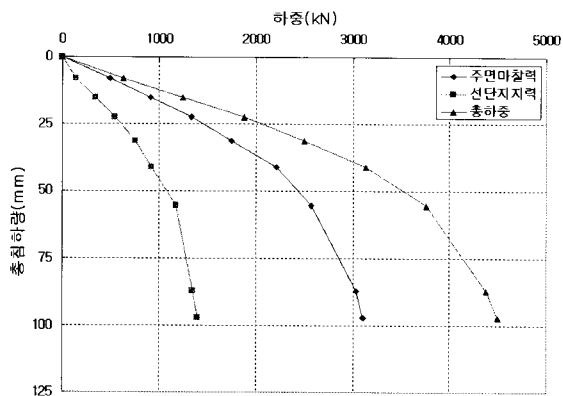
말뚝정재하시험으로부터 구한 각 말뚝의 하중-침하량 관계를 그림 3에 나타내었으며 그림 4에는 각 말뚝의 하중단계별 축하중 분포를 나타내었다. 그림 4의 말뚝 축하중 분포를 참고하여 말뚝하중을 주면마찰력과 선단지지력으로 분리하여 그림 3에 나타내었다. 그



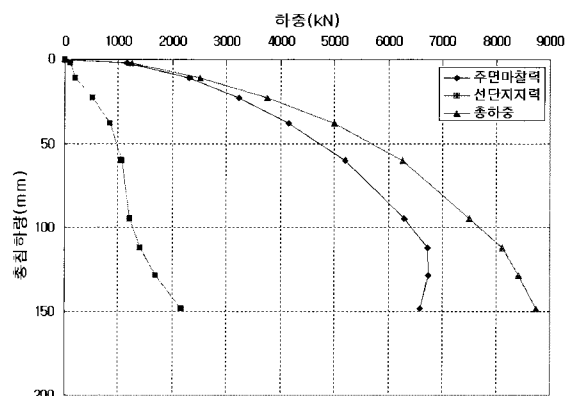
(a) TP1



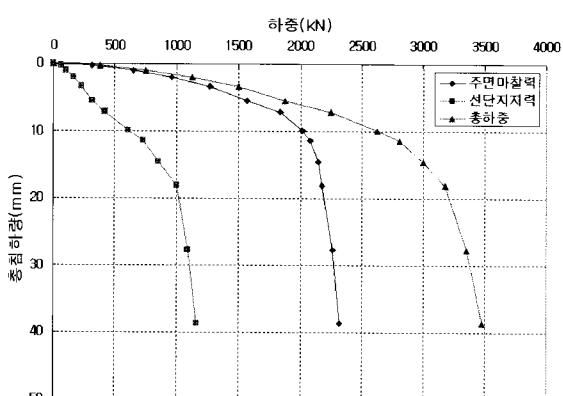
(b) TP2



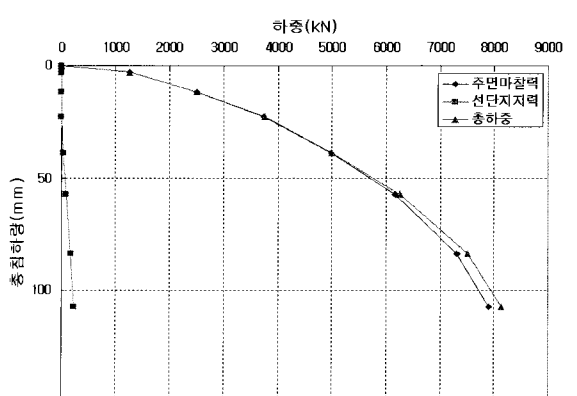
(c) TP3



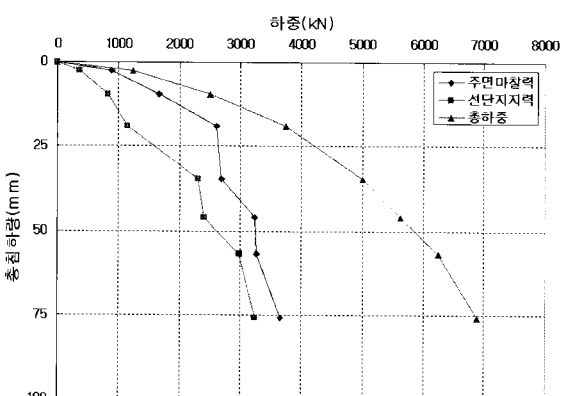
(d) TP4



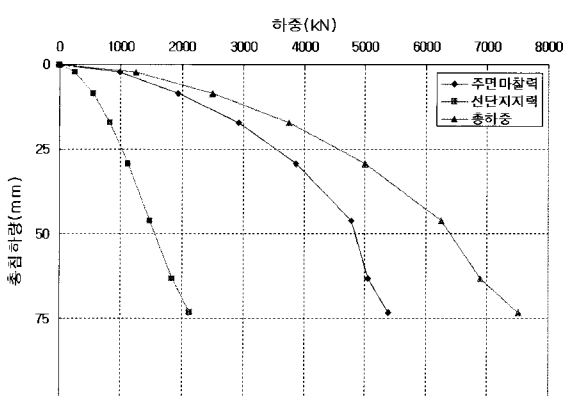
(e) TP5



(f) TP6

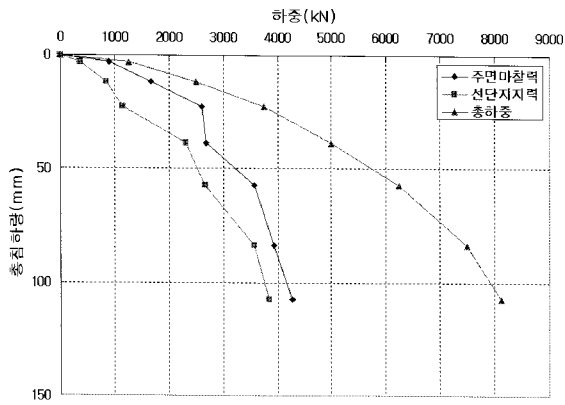


(g) TP7



(h) TP8

그림 3. 각 말뚝의 하중-침하량 관계



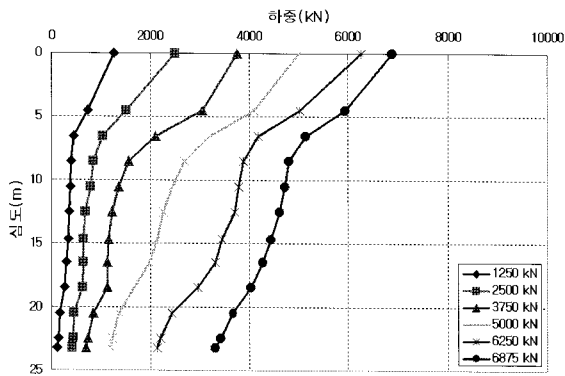
(i) TP9

그림 3. 각 말뚝의 하중-침하량 관계 (계속)

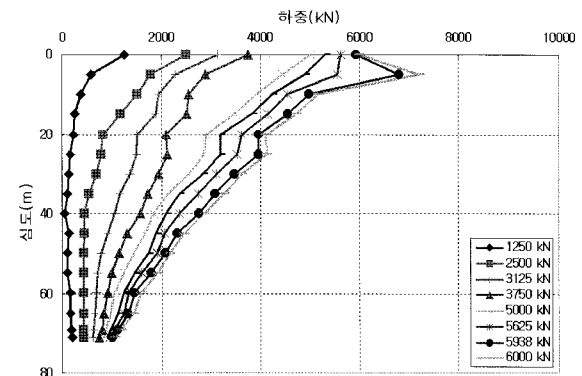
림 3에서 보면 일반적으로 주변마찰력은 파괴상태에 있어도 선단지지력은 탄성적인 거동상태를 나타내고 있다.

#### 4.2 f-w 곡선의 양상

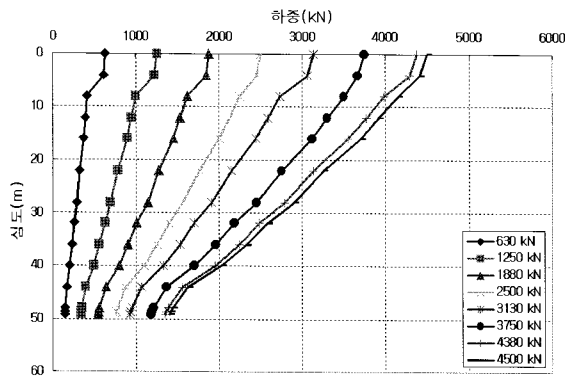
현장시험으로부터 구한 모든  $f-w$  곡선을 그림 5에 나타내었다. 그림에 표시된 기호에 해당하는 말뚝과 깊이는 표 1과 표 2에 나타나있다. 그림에서는 일관된 경향을 찾아보기 어렵다. 따라서 이 곡선들을 일단 사질토와 점성토에 대한 것으로 나누어보았다. 이 때 동일한



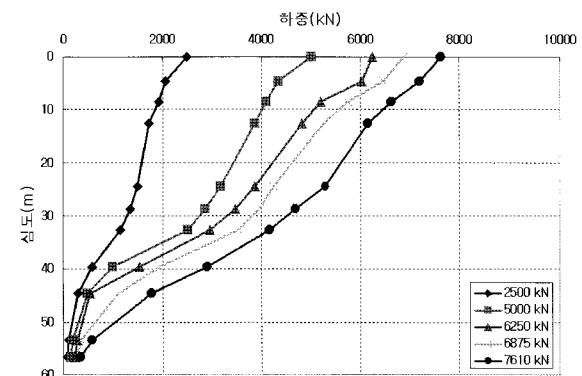
(a) TP1



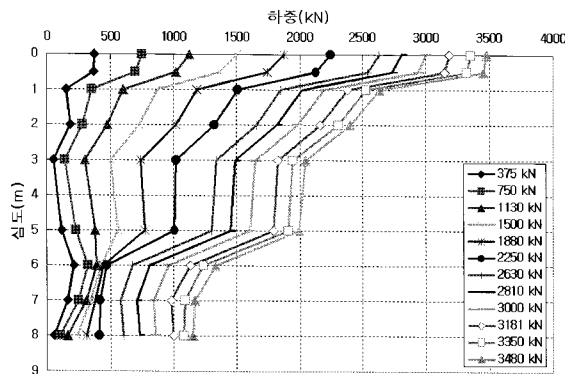
(b) TP2



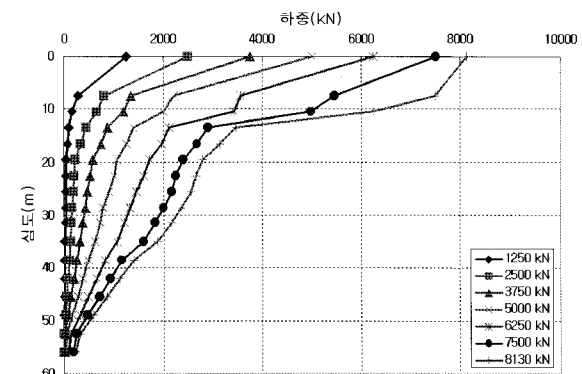
(c) TP3



(d) TP4

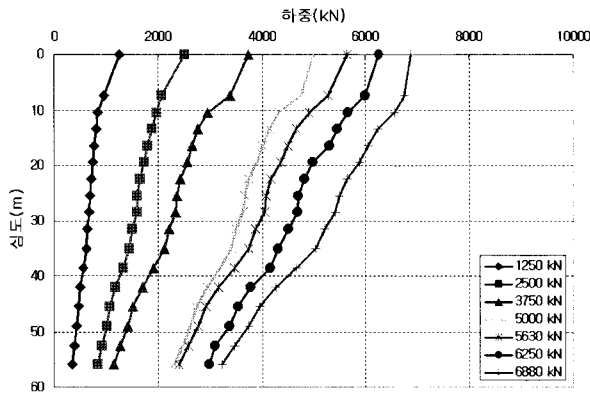


(e) TP5

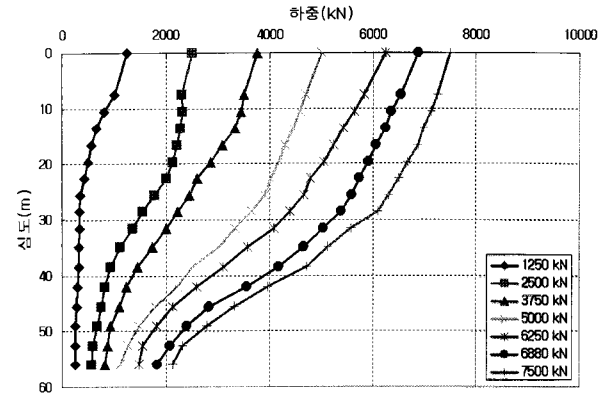


(f) TP6

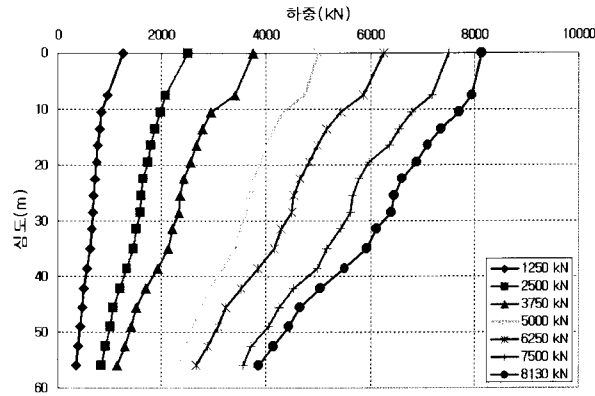
그림 4. 각 말뚝의 하중단계별 축하중 분포



(g) TP7



(h) TP8



(i) TP9

그림 4. 각 말뚝의 하중단계별 축하중 분포 (계속)

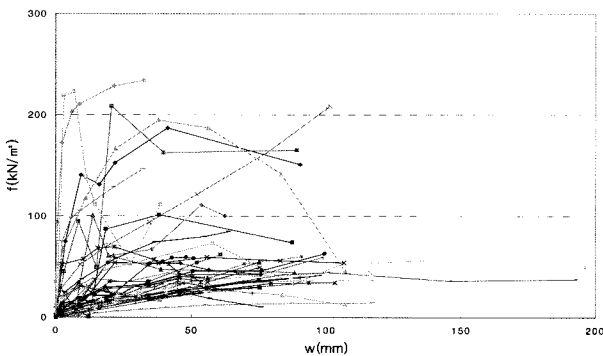


그림 5. 전체  $f-w$  곡선

말뚝에서도 사질토 부분과 점성토 부분을 분리하여 각기 검토하였다. 그러나 역시 일관된 경향이 나타나지 않았다. 다음으로는 각각을  $N_{60}$  값 0~10, 10~20, ...와 같이 10 단위로 나누어 비교해보고 또한 깊이 0~10m, 10m~20m, ...와 같이 10m 단위로 나누어 비교해보았다. 그러나 이러한 분류로서는 곡선들의 일관성을 찾기가 어려웠다. 따라서 앞의 문헌연구에서처럼 주면마찰력과 침하량을 각각 최대주면마찰력  $f_{max}$ 와 지름  $D$ 로 정규화하기로 하였다.

하중전이함수의 계수인  $f_{max}$ 는 하중전이곡선에서 주면마찰력이 유효하거나 충분히 발휘되는 점이다. 이 점은 최대주면마찰력 또는 하중전이곡선에서 경사가 현저하게 작아지는 점이 이에 속한다. 또한 Terzaghi and Peck(1967)은 점토지반상의 말뚝의 경우 말뚝지름의 약 1%에 해당하는 변위 발생시 극한 주면지지력이 발생된다고 보고하였으며 Das(2007)에서는 최대주면마찰력은 말뚝과 지반의 상대변위가 5~10mm일 때 발생하는 것으로 되어있다. 따라서 본 연구에서 사용된  $f_{max}$  값은 최대값이 아닌 한계값으로의 접근을 시도하여(Balakrishnan et al., 1999), 말뚝에 설치된 센서의 위치에서 계측된 지층 구간별  $f-w$  곡선을 이용하여 말뚝 지름의 1%의 변위 발생시의 지지력을  $f_{max}$ 의 값으로 채택하였다. 시험결과에서 1% 변위 이후로도  $f$  값이 계속 증가하는 것은 지반의 변형률경화(strain hardening)현상으로 설명할 수 있으며 또한 말뚝 상부에서의 마찰력 파괴에 따른 말뚝 하부로의 순차적인 하중전이로 인한 과도한 응력과 변위로 인한 센서의 오작동도 있었을 것으로 보인다.



표 1. 사질토에서의 기호 및 최대주면마찰력의 실측값과 이론값

말뚝 번호	토층(깊이, m)	주면마찰력 기호	주면하중 전이곡선 기호	실측값, kN/m <sup>2</sup>	Meyerhof (1976), kN/m <sup>2</sup>	Decourt (1982), kN/m <sup>2</sup>	Briaud et al.(1985), kN/m <sup>2</sup>
TP1	풍화토(5.4~8.1)	■	—■—	63.5	30	59.5	49
	점토질모래(16.1~18.5)	◆	—■—	10.2	38	72.7	52.6
TP2	매립토(0~8)	▲	—*—	55	26	52.9	47.1
	실트질모래(8~17.7)	●	—●—	25	34	66.1	51
TP3	실트질모래(0~2)	×	—+—	1.3	16	36.4	40.9
	자갈질모래(2~11.3)	*	—+—	10	18	39.7	42.4
	실트질모래(25.5~27)	+	—+—	2	230	389.5	88.7
	실트질모래(30~49)	—	—+—	3	74	132.1	63.8
TP4	실트질모래(0~5)	□	—+—	16	4	16.6	27.4
	실트질모래(16.5~33)	◇	—+—	4	56	102.4	58.8
TP5	실트질모래(8.4~9.5)	△	—+—	219	188	320.2	84
TP6	매립층(0~7.5)	○	—*—	88	14	33.1	39.4
	상부모래(7.5~13.5)	×	—*—	42	20	43	43.7
	중간모래(34.2~42)	*	—●—	3	60	109	60
	하부모래(44.6~56)	+	—+—	3	56	102.4	58.9
TP7	매립층(0~7.5)	■	—+—	26	14	33.1	39.4
	상부모래(7.5~13.5)	◆	—◆—	15	20	43	43.7
	중간모래(34.2~42)	▲	—▲—	14	60	109	60
	하부모래(44.6~56)	●	—*—	9	56	102.4	58.9
TP8	매립층(0~7.5)	■	—+—	15	14	33.1	39.4
	상부모래(7.5~13.5)	◆	—+—	12	20	43	43.7
	중간모래(34.2~42)	▲	—+—	30	60	109	60
	하부모래(44.6~56)	●	—■—	12	56	102.4	58.9
TP9	매립층(0~7.5)	□	—+—	25	14	33.1	39.4
	상부모래(7.5~13.5)	◇	—*—	15	20	43	43.7
	중간모래(34.2~42)	△	—●—	15	60	109	60
	하부모래(44.6~56)	○	—+—	10	56	102.4	58.9

가장 적합한 최대주면마찰력식을 선정하기 위하여 현장시험으로 구한  $f-w$  곡선으로부터 앞에 설명한 방법으로 최대주면마찰력  $f_{max}$ 를 구하고 이 결과들을 사질토에서 구한 것과 점성토에서 구한 것으로 나누어 앞의

예측방법들과 비교해보았다. 또한 주면마찰력 하중전이곡선을 구하기 위하여 모든  $f-w$  곡선을 분석하였다. 자세한 내용은 다음과 같다.

### 4.3 최대주면마찰력

#### 4.3.1 사질토의 최대주면마찰력

각 토층별로 구한 최대주면마찰력 중 사질토에 해당하는 값들을 표 1과 같이 정리하였다. 표에는 각 토층에

대해 사용될 기호들과 앞에서 살펴본 이론식들로 구한 값들을 보이고 있다. 각 이론식의 정확성을 알아보기 위하여 각 이론식과 실측값을 그림 6과 같이 나타내었다. 각각의 그래프에는 상관도를 파악하기 위해 45°-Line을 함께 도시하여 비교하였다.

표 2. 점성토에서의 기호 및 최대주면마찰력의 실측값과 이론값

말뚝번호	토층(깊이, m)	주면마찰력 기호	주면하중 전이곡선 기호	실측값, kN/m <sup>2</sup>	정역학적 지지력 공식, kN/m <sup>2</sup>	Meyerhof (1976), kN/m <sup>2</sup>	Decourt (1982), kN/m <sup>2</sup>	Shioi and Fukui (1982), kN/m <sup>2</sup>	Briaud et al. (1985), kN/m <sup>2</sup>
TP1	점토(0~5.4)	■	◆	91	10.2	2	13.3	10	22.4
	점토(8.1~16.1)	◆	▲	13	10.2	2	13.3	10	22.4
TP2	실트질점토(17.7~33.2)	▲	+	11	10.2	2	13.3	10	22.4
	모래질점토(33.2~66.9)	●	—	3	42.3	18	39.7	90	42.4
TP3	실트질점토(11.3~20.3)	×	■	3	10.2	2	13.3	10	22.4
	실트질점토(24~25.5)	⊗		2.4	123.9	40	76	200	65.3
TP4	실트질점토(5~16.5)	+		7	31.6	12	29.8	60	37.7
TP5	실트질점토(0~1.2)	□	—	86	10.2	2	13.3	10	22.4
	실트질점토(1.2~8.4)	◇	◆	186	64	32	63	160	50
TP6	상부점토(13.5~34.2)	△	⊗	5	23.6	8	23.2	40	33.5
	하부점토(42~44.6)	○	+	3	83.2	46	85.9	230	55.6
TP7	상부점토(13.5~34.2)	×	■	7	23.6	8	23.2	40	33.5
	하부점토(42~44.6)	⊗	⊗	13	83.2	46	85.9	230	55.6
TP8	상부점토(13.5~34.2)	■	—	28	23.6	8	23.2	40	33.5
	하부점토(42~44.6)	◆		15	83.2	46	85.9	230	55.6
TP9	상부점토(13.5~34.2)	□	⊗	7	23.6	8	23.2	40	33.5
	하부점토(42~44.6)	◇	+	14	83.2	46	85.9	230	55.6

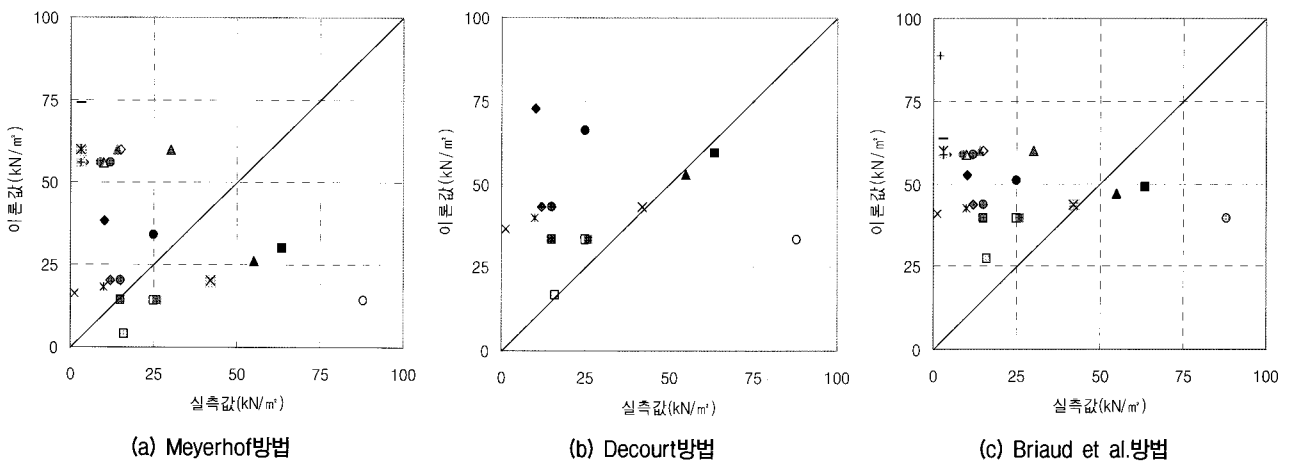


그림 6. 사질토에서의 최대주면마찰력 이론값과 실측값의 비교

그림으로 알 수 있는 바와 같이 각 방법으로 구한 값은 실측값과 그다지 일치하지 않았고, 각 방법들 사이의 정확도도 그다지 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 Meyerhof의 방법으로 구한 값이 그나마 비교적 실측값과 유사하게 나타나는 경향을 보인다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사질토의 최대주면마찰력을 구하는 방법으로 보편적으로 많이 사용되고 있는 Meyerhof방법을 사용하기로 하였다.

### 4.3.2 점성토의 최대주면마찰력

각 토층별로 구한 최대주면마찰력 중 점성토에 해당하는 값들을 표 2와 같이 정리하였다. 표에는 각 토층에 대해 사용될 기호들과 앞에서 살펴본 이론식들로 구한 값들을 보이고 있다. 각 이론식의 정확성을 알아보기 위하여 각 이론식과 실측값을 그림 7과 같이 나타내었다. 각각의 그래프에는 상관도를 파악하기 위해 45°-Line을 함께 도시하여 비교하였다.

그림으로 알 수 있는 바와 같이 각 방법으로 구한 값

은 실측값과 그다지 일치하지 않았고, 각 방법들 사이의 정확도도 그다지 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 사질토에서와 마찬가지로 Meyerhof의 방법으로 구한 값이 그나마 비교적 실측값과 유사하게 나타나는 경향을 보인다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 점성토의 최대주면마찰력을 구하는 방법도 보편적으로 많이 사용되고 있는 Meyerhof방법을 사용하기로 하였다.

## 4.4 주면하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교

### 4.4.1 현장재하시험결과의 주면하중전이곡선

이제  $f-w$ 곡선의  $f$  대신  $f$ 를  $f_{max}$ 로 나누어 정규화한  $f/f_{max}$ 를 적용한  $f/f_{max}-w$  곡선을 이용하여 앞에서의 작업을 반복하였다. 또한  $f-w$ 곡선의  $w$  대신  $w$ 를  $D$ 로 나누어 정규화한  $w/D$ 를 적용한  $f-w/D$  곡선을 사용하여 위의 작업을 반복하였다. 그러나 마찬가지로 곡선들의 일관성은 나타나지 않았다.

그 다음으로  $f-w$ 곡선의  $f$  대신  $f$ 를  $f_{max}$ 로 나누어

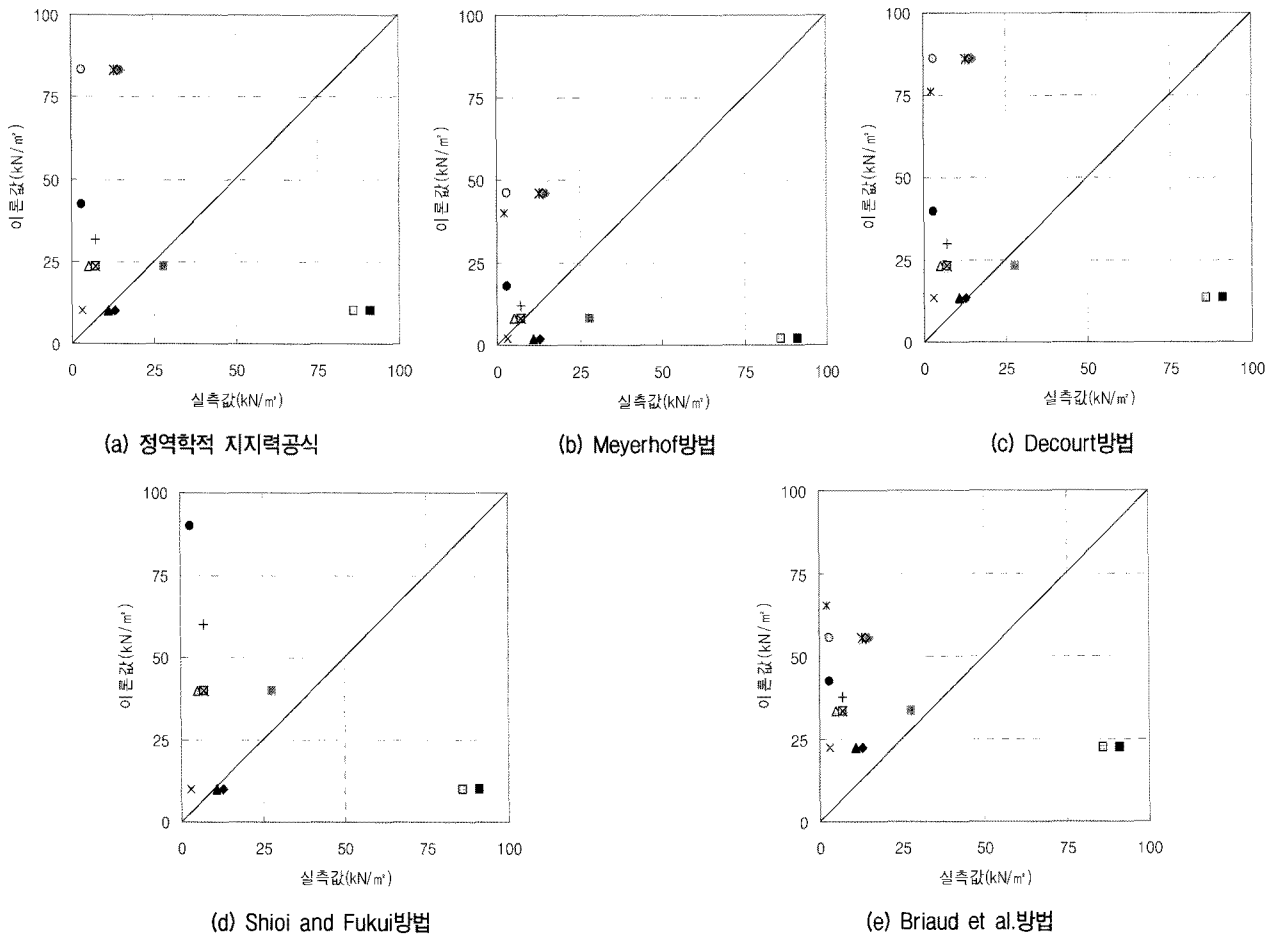


그림 7. 점성토에서의 최대주면마찰력 이론값과 실측값의 비교

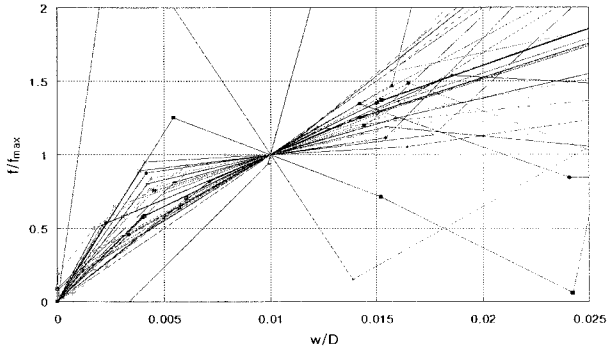


그림 8. 전체  $f/f_{\max} - w/D$  곡선

정규화한  $f/f_{\max}$ 를 적용하고  $w$  대신  $w$ 를  $D$ 로 나누어 정규화한  $w/D$ 를 적용한  $f/f_{\max} - w/D$  곡선을 사용하기로 하였다. 그림 8에는 시험결과 모두를 보이고 있다. 마찬가지로 이 그림에서 곡선들이 일관성을 갖고 있다고 단정하기는 어렵다. 이제 이 곡선들을 가지고 다음과 같이 앞의 작업을 반복해보았다.

#### 4.4.2 사질토 주면하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교

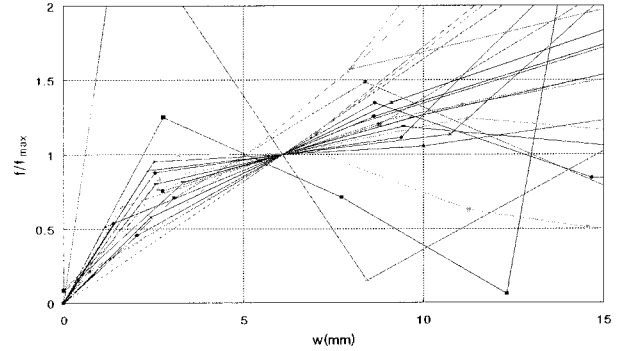
먼저 그림 8의 결과들 중 사질토에 관한 것을 선택하여 그림 9(a)와 같이 API규준에서처럼  $f/f_{\max} - w$ 로 정리하고 (b)에는  $f/f_{\max} - w/D$ 로 정리해보았다. 그 결과  $f/f_{\max} - w/D$ 로 정리한 것이 더 일관성을 보여 이 방법을 사용하기로 하였다. 앞에서와 같이  $N_{60}$  값 0~10, 10~20, ...와 같이 10 단위로 나누어 비교해보고 또한 깊이 0~10m, 10m~20m, ...와 같이 10m 단위로 나누어 비교해보았다. 그러나 별다른 경향성이 나타나지 않아서 사질토 전체에 대한 평균선을 구하기로 하였다.

그림 9(b)에는 곡선들의 평균선을 나타내었다. 평균선의 식은 가장 보편적으로 쓰이는 쌍곡선함수식으로 나타내었으며 다음과 같다.

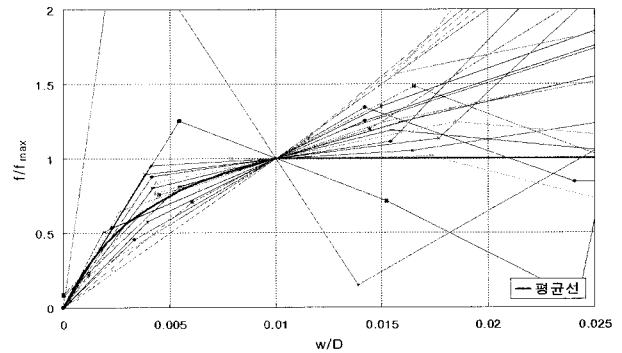
$$\frac{f}{f_{\max}} = \frac{\alpha \cdot \frac{w}{D}}{\beta + \frac{w}{D}} \quad (7)$$

여기서,  $\alpha, \beta$  : 상수

그림 9에서  $\alpha$ 는 1.5,  $\beta$ 는 0.005이다. 사질토의 평균선과 앞에서 살펴본 API곡선을 비교하려 하였으나 API곡선의  $x$ 축이 변위량  $w$ 인데 반해 본 연구에서 구한 평균선의  $x$ 축은  $w/D$ 로서 비교가 곤란하였다.

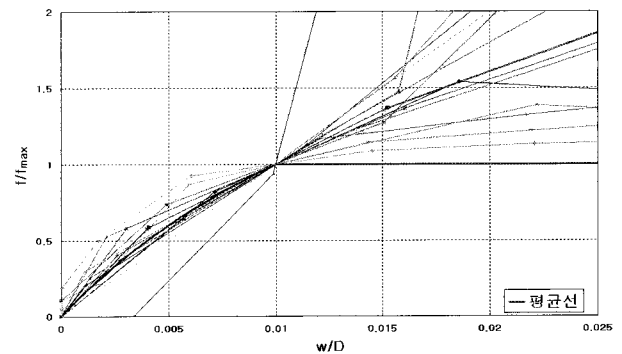


(a)  $f/f_{\max} - w$  곡선

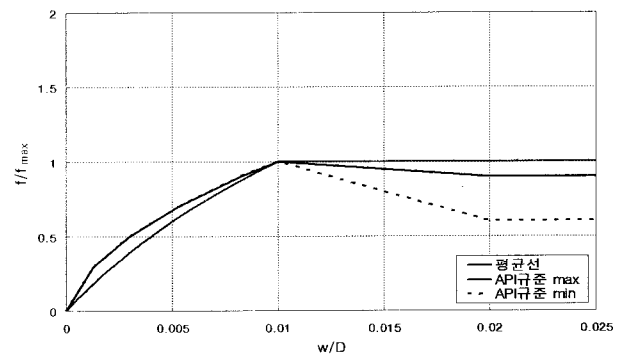


(b)  $f/f_{\max} - w/D$  곡선

그림 9. 사질토의 주면하중전이곡선



(a)  $f/f_{\max} - w/D$  곡선



(b) API 곡선과의 비교

그림 10. 점성토의 주면하중전이곡선

#### 4.4.3 점성토 주변하중전이곡선의 평균선 도출 및 비교

그림 8의 결과들 중 점성토에 관한 것은 그림 10과 같이 나타냈다. 사질토의 경우와 마찬가지로  $N_{60}$  값 0~10, 10~20, ...와 같이 10 단위로 나누어 비교해보고 또한 깊이 0~10m, 10m~20m, ...와 같이 10m 단위로 나누어 비교해보았다. 그러나 마찬가지로 별다른 경향성이 나타나지 않아서 점성토 전체에 대한 평균선을 구하기로 하였다.

그림 10에는 곡선들의 평균선을 나타내었다. 평균선

의 식은 앞서서와 마찬가지로 쌍곡선함수식으로 나타내었으며 그림 10에서  $\alpha$ 는 3,  $\beta$ 는 0.02이다. 그림 10(b)에는 본 연구로 구한 결과와 API규준의 곡선을 비교하였다. 두 곡선은 비교적 유사함을 볼 수 있다.

### 5. 검증

일련의 과정을 통하여 도출한 주변하중전이곡선의 국내지반에 대한 적용성 여부를 판단하기 위하여 3개 현장에서 각각 1개씩 총 3개의 강관말뚝(TP10, TP11,

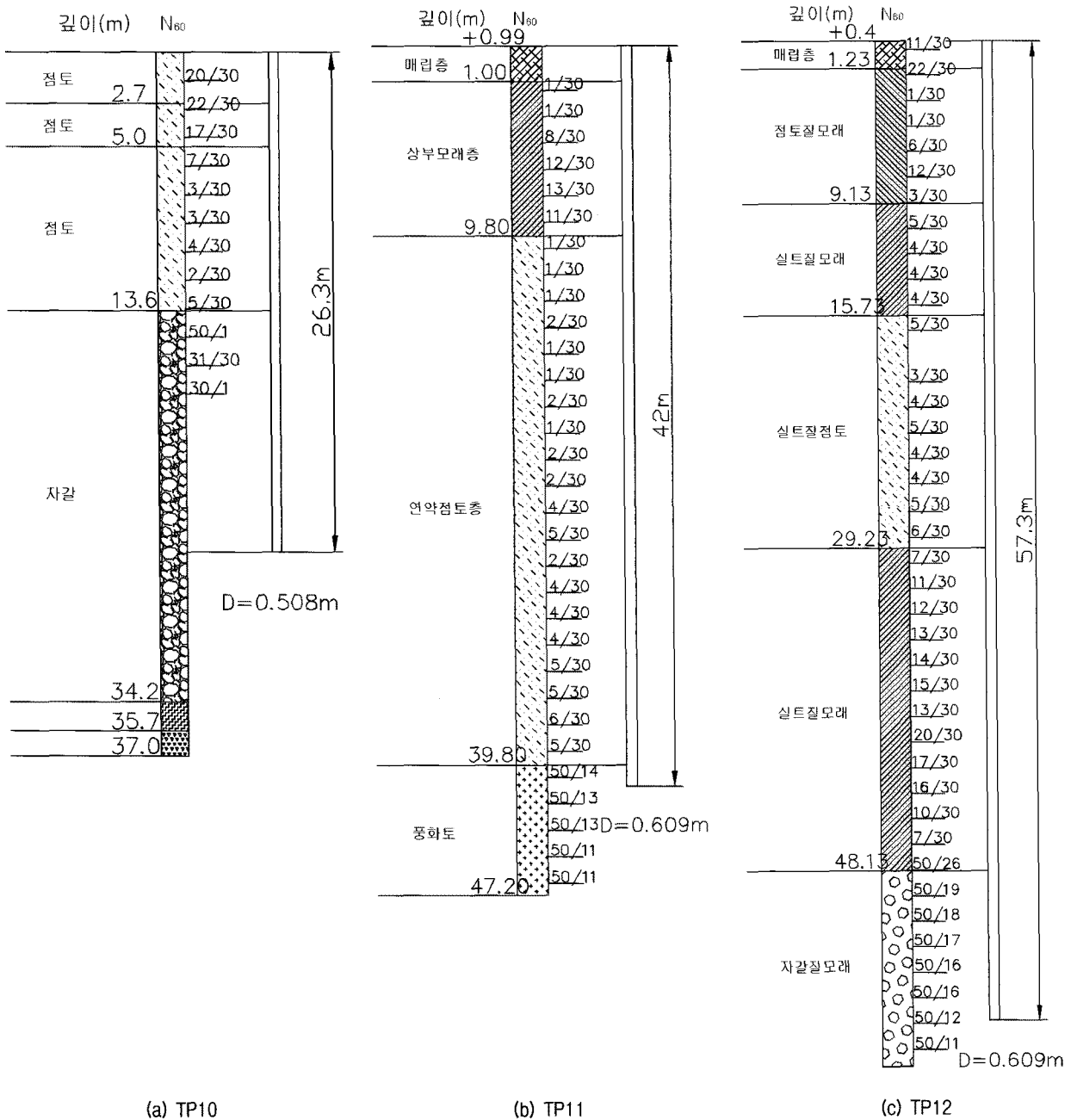


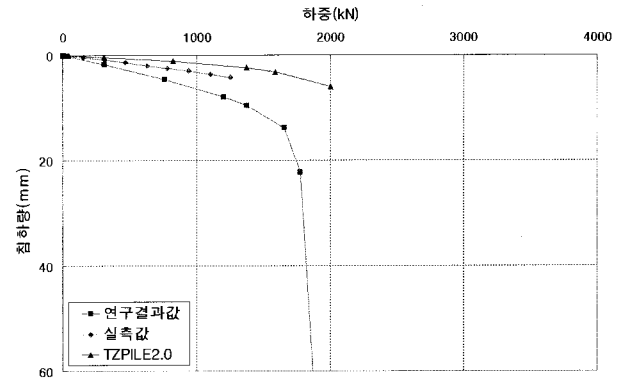
그림 11. 검증에 사용한 현장의 지반 및 말뚝조건

TP12)에 대한 지반조사결과와 말뚝설치조건(그림 11 참조) 및 정재하시험으로 구한 하중-침하량 곡선을 수집하였다. 다음으로 각 말뚝에 대하여 축방향 하중을 받는 강관말뚝 또는 현장타설말뚝의 해석에 널리 사용되는 프로그램인 TZPILE 2.0을 이용하여 하중-침하량곡선을 도출하였다. TZPILE은 지반과 말뚝조건을 입력하면 내장된 마찰력 및 선단지지력 하중전이곡선을 이용하여 하중-침하량 곡선을 생성하는 프로그램이다. 다음으로 동 프로그램에 본 연구에서 도출한 마찰력 하중전이곡선을 적용하여 하중-침하량 곡선을 도출하였다.

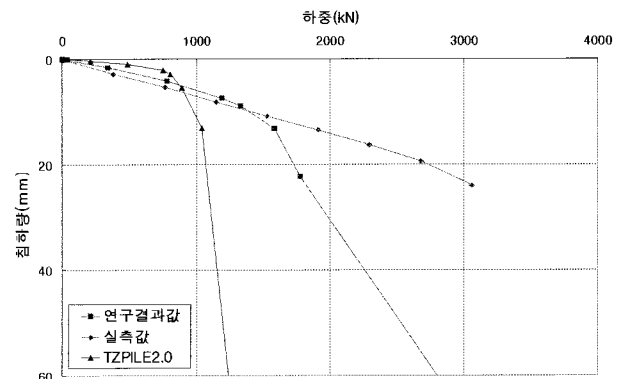
TZPILE 2.0을 이용하여 하중-침하량 곡선을 얻기 위하여 각 지반의 물성값과 말뚝의 조건을 입력해 주어야 한다. 필요한 지반의 물성값으로는 유효단위중량, 비배수전단강도, 내부마찰각 등이 있는데 이 중 직접 측정이 이루어지지 않은 값들은  $N_{60}$  값 등으로부터 환산하여 적용하였다. 말뚝의 조건으로는 단면적, 탄성계수, 길이 등이 있으며 이들을 사용하여 하중-침하량 곡선을 구하였다.

본 연구의 결과를 TZPILE 2.0에 적용할 때 본 연구에서 얻은 주변하중전이곡선은  $f/f_{max} - w/D$ 의 형태이고 프로그램에 대입할 형태는  $f-w$ 의 형태이므로  $f/f_{max}$ 에는 앞서 구한 최대주변마찰력  $f_{max}$ 를 곱하여  $f$ 로,  $w/D$ 에는 말뚝의 지름인  $D$ 를 곱하여  $w$ 의 형태로 각각 변환한 뒤 대입하였다. 그리고 본 연구에서는 선단하중전이곡선에 대한 연구가 이루어지지 않아 문헌연구를 수행한 API규준(1993)의 선단하중전이곡선을 주변하중전이곡선과 같은 방법으로 변환, 입력한 뒤 하중-침하량 곡선을 구하였다.

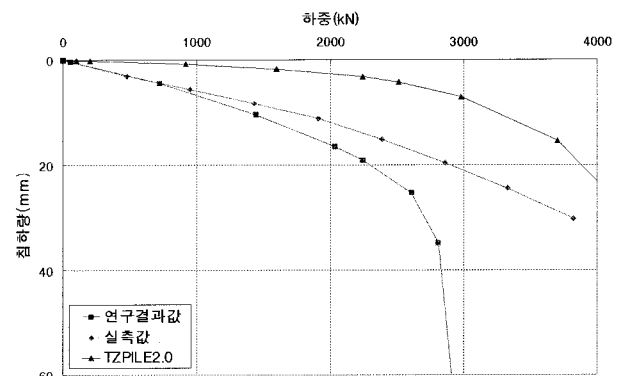
현장재하시험을 통해 얻은 실측 하중-침하량 곡선과 연구를 통하여 도출한 마찰력 하중전이곡선을 이용하여 얻은 하중-침하량 곡선, TZPILE 2.0을 통하여 얻은 하중-침하량 곡선을 아래 그림 12와 같이 상호 비교하였다. 3현장의 그래프를 각각 살펴보면 TP10은 본 연구의 결과로부터 구한 결과가 TZPILE로 얻은 결과보다 다소 차이는 있으나 보수적이었고 TP11과 12에서는 본 연구의 결과로부터 구한 결과가 실측값과 비교적 유사한 양상을 보인 반면 후반부의 거동이 다소 차이가 있으나 TZPILE로 얻은 결과보다는 보수적이었다. 일반적으로 본 연구의 결과를 적용하여 얻은 하중-침하량 곡선이 기존의 TZPILE 2.0으로 얻은 곡선보다 비교적 실측값에 가까운 경향을 보였으며 보수적으로 나타났다.



(a) TP10



(b) TP11



(c) TP12

그림 12. 하중-침하량 곡선 비교

## 6. 결론

타입강관말뚝의 하중전이곡선을 도출하기 위하여 국내 6개 현장에서 수행된 9개의 말뚝재하시험결과를 분석하고 그 결과를 다른 3개 현장의 3개 말뚝재하시험결과를 이용하여 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존의 여러 가지 최대주변마찰력 예측방법으로 구한 값과 현장재하시험결과로 얻은 값을 비교한 결과 전체적으로 정확성이 떨어졌다. 다만 그 중 Meyerhof

- 의 방법은 비교적 일관된 경향을 제공하였으며 보편적으로 많이 쓰이므로 본 연구에서 사용하였다.
- (2) 현장재하시험으로 구한 하중전이곡선들을 분석하여 사질토와 점성토에 대하여 각각  $f/f_{\max} - w/D$  곡선의 평균선을 구하였으며 각 곡선을 쌍곡선함수로 나타내었다.
  - (3) 본 연구에서 구한 점성토지반에 대한 주변하중전이곡선을 API규준의 곡선과 비교하였으며 두 곡선은 유사하게 나타났다.
  - (4) 본 연구에서 구한 하중전이곡선들과 기존의 TZPILE 2.0으로 하중-침하량 곡선을 구하고 실측값과 비교해 본 결과 일반적으로 본 연구의 결과를 적용하여 얻은 하중-침하량 곡선이 기존의 TZPILE 2.0으로 얻은 곡선보다 비교적 실측값에 가까운 경향을 보였으며 보수적으로 나타났다. 향후 개선된 선단하중전이곡선이 도출된다면 보다 정확하게 말뚝의 하중-침하량 관계를 예측할 수 있을 것이다.

향후 더 정확하고 더 많은 현장재하시험결과를 수집·분석하여 본 연구에서 도출한 주변하중전이곡선에 대한 보강 및 검증이 필요할 것으로 보이며, 주변하중전이곡선에 비해 비교적 연구가 적은 선단하중전이곡선에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-D00806).

## 참고 문헌

1. 한국지반공학회 (2003), *구조물 기초설계기준 해설*, 제5장 깊은 기초, pp.277-378.
2. 土質工学会 (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, pp.284-289.
3. American Petroleum Institute (1993), *Recommended Practice of Planning, Designing, and Construction of Fixed Offshore Platforms*, Report No. API-RF-2A, Dallas, pp.115.
4. Balakrishnan, E. G., Balasubramaniam, A. S. and Phien-Wej, N. (1999), "Load Deformation Analysis of Bored Piles in Residual Weathered Formation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.125(2), pp.122-131.
5. Briaud, J. L., Tucker, L., Lytton, R. L. and Coyle, H. M. (1985), "Behavior of Piles and Pile Groups in Cohesionless Soils", *Final Report*, Report No. FHWA/RD-83/038, NTIS PB86-152089/AS.
6. 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.
7. Coyle, H. M. and Sulaiman, I. H. (1967), "Skin Friction for Steel Piles in Sand", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.93, No.SM6, pp.261-277.
8. Das, B. M. (2007), *Principles of Foundation Engineering*, 6th Ed., Thomson, pp.491-590.
9. Decourt, L. (1982), "Prediction of the Bearing Capacity of Piles Based Exclusively on N values of the SPT", *Proc. ESOPT2*, Amsterdam 1, pp.29-34.
10. Hara, A., Ohata, T. and Niwa, M. (1971), "Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.3, pp.1-12.
11. Meyerhof, 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.
12. Reese, L. C. and O'Neil, M. W. (1989), "New Design Method for Drilled Shafts from Common Soil and Rock Tests", *Proc. Foundation Engineering : Current Principles and Practices*, American Society of Civil Engineers, Vol.2, pp.1026-1039.
13. Shioi, Y. and Fukui, J. (1982), "Application of N-Value to Design of Foundations in Japan", *Proc. Second European Symposium on Penetration Testing*, Vol.1, pp.159-164.
14. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1989), "Settlement of Point Bearing Pile Foundation : Settlement of Floating Foundation", *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, pp.1150-1158.
15. 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.

(접수일자 2009. 3. 13, 심사완료일 2009. 8. 26)