

# 최대곡률 방법을 이용한 말뚝의 연직지지력 연구

A Study on the Vertical Bearing Capacity  
of Pile using the Maximum Curvature Method

류 정 수\*1

Ryu, Jeong-Soo

김 석 열\*2

Kim, Seog-Yeol

---

---

## Abstract

Although the pile load test provides various informations to predict the bearing capacity of a pile, it has a considerable difficulty of requiring a large amount of weight to enable the test pile to be loaded sufficiently until the yielding or ultimate load is obtained.

Many graphical and mathematical methods have been attempted to estimate the bearing capacity from the result of a vertical load test without loading to failure.

In the previous work an analytical method to estimate the failure load using the maximum curvature which was based on the Southwell's theory was presented by the author. The failure load, as proposed by Crowther, should be defined as the load at which the predefined that criteria are exceeded.

The allowable loads by Davisson's method and DIN 4014 were compared with the loads of piles using the maximum curvature, and this paper proposed the allowable load in which the safety factor of the maximum curvature was 2.5.

As a result of study, it was reasonable to conclude that the allowable load determined by the maximum curvature method could estimate the vertical bearing capacity from the pile load test without loading to failure.

## 요 지

말뚝의 재하시험이 연직지지력을 추정하기 위한 다양한 정보를 제공한다 할지라도 시험 말뚝을 극한하중까지 도달하도록 충분히 재하시킨다는 것은 상당히 어려운 일이며, 이와 같이 파괴시까지 재하지 못한 말뚝의 연직재하시험의 결과로부터 지지력을 추정하는데 있어서 많은 도해적 방법과 수학적 방법이 시도되었다.

파괴하중을 추정하기 위하여 Southwell의 이론을 기초로 최대곡률을 이용한 해석적 방법이 필

---

\*1 정희원, 브니엘 컨설턴트 대표

\*2 정희원, 농어촌진흥공사 농공기술연구소

자 등에 의하여 발표된 바 있다. 여기서 파괴하중은 Crowther가 정의한 바와 같이 특정한 기준을 초과하였을 때의 하중으로 정의하였다.

본 논문은 최대극률 방법에 의한 허용하중을 결정하기 위하여 Davission의 방법 및 DIN 4014의 허용하중과 비교하여 최대극률 방법의 안전율을 2.5로 제안하였다.

그 결과 파괴시까지 재하하지 못한 연직재하시험의 결과치로부터 말뚝의 연직지지력을 추정하는데 있어서 최대극률 방법에 의한 허용하중의 결정은 타당성이 있는 것으로 판단되었다.

## 1. 서론

재하시험시 길이가 짧고 소구경인 말뚝은 지지력이 작아서 항복하중 또는 극한하중에 이르는 하중-침하량 곡선을 쉽게 얻을 수 있어 지지력을 간단히 추정할 수 있으나 대구경이고 지지력이 큰 말뚝은 재하장치의 용량 및 성능, 시험종료조건, 공정 등의 여러 제약조건으로 인하여 항복하중이나 극한하중까지 재하하지 못하고 대부분 시험이 종료된다.

Terzaghi-Peck의 linch 침하량이나 DIN 4014의 20mm의 규준치를 적용하여 지지력을 추정하는 방법이 있으나 재하시험시 지지력이 큰 말뚝에서는 일정량의 침하량까지도 재하하지 못하고 시험이 종료되므로 이러한 하중과 침하량의 결과치로 지지력을 추정한다는 것은 대단히 어려운 일이다.

말뚝재하시험의 결과로부터 지지력을 추정하는 방법으로는 도해적 방법과 수학적 이론에 의한 해석적 방법이 있으나 도해적 방법은 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 도면의 축척에 의한 시각적 오차와 개인오차로 일정한 값을 구하기 어려우나 해석적 방법은 이러한 오차의 영향을 받지 않고 일정한 값을 구할 수 있다.

Timoshenko<sup>(19)</sup>의 저서에 수록된 Southwell 이론은 쌍곡선 형태를 갖는 하중-침하량 곡선에 의하여 지지력을 추정하는 해석적 방법으로 탄성체에서 하중과 처짐이 쌍곡선의 형태를 갖는 공식을 발표하였고, Kondner<sup>(18)</sup>는 이를 점토에 적용시켜 삼축압축시험에서 점토의 응력과 변형률의 관계도 이를 만족한

다는 것을 증명하였다.

Chin<sup>(12)</sup>은 이 이론을 말뚝에 적용하여 말뚝의 하중과 침하량도 쌍곡선 함수의 관계가 있다는 것을 수차례에 걸쳐 증명하였으며,<sup>(12~16)</sup> 필자 등<sup>(6)</sup>도 이를 검증하였다.

Southwell의 이론을 말뚝에 적용시킨 Chin의 방법은 쌍곡선 함수에 의한 말뚝의 하중과 침하량 곡선이 쌍곡선의 점근선을 극한하중으로 정의하므로써 서로 다른 하중-침하량 곡선 일지라도 점근선이 같으면 극한하중이 동일하게 되는 문제점을 극복하지 못하였다.

황정규 등<sup>(9)</sup>은 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최대극률을 이용하여 파괴하중을 추정하는 방법을 발표한 바 있다. 본 논문은 이러한 최대극률 방법에 의한 허용하중을 결정하기 위하여 연직재하시험의 결과치로부터 Davission의 방법 및 DIN 4014에 의한 말뚝의 허용하중과 비교·분석하여 최대극률 방법의 안전율을 제안하고자 한다.

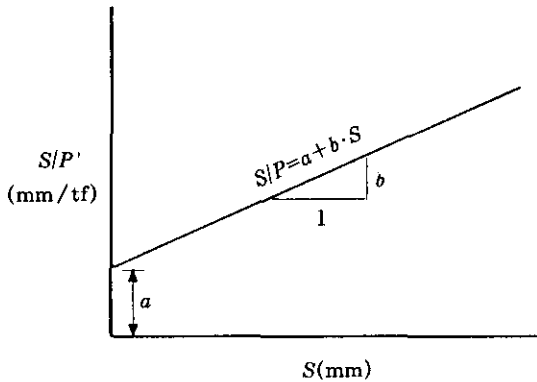
## 2. 최대극률 방법에 의한 파괴하중

말뚝의 연직재하시험에서 실측한 하중  $P$ 와 침하량  $S$ 를 이용하여 횡축을  $S$ , 종축을  $S/P$ 로 나타내면 그림1(a)와 같은 직선으로 표시되어, 이를 식으로 나타내면 식(1)과 같고 이 직선의 절편  $a$ 와 기울기  $b$ 는 회귀분석에 의하여 결정된다.

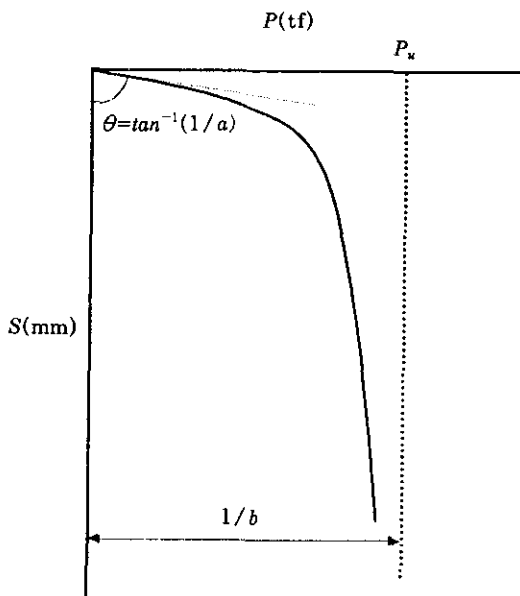
구하여진  $a$ 와  $b$ 에 의하여 그림1(b)와 같이 횡축을  $P$ , 종축을  $S$ 로 하여  $P-S$  곡선을 나타내면 접선각  $\theta = \tan^{-1}(1/a)$ 인 쌍곡선 형태의 곡선이 되며,  $P_0$ 는 점근선으로서 극한 하중이

된다.

$$\frac{S}{P} = a + b \cdot S \quad (1)$$



(a) S-S/P의 관계



(b) 쌍곡선 형태의 P-S

그림 1. P-S 곡선<sup>(10)</sup>

Southwell은 압축하중을 받는 탄성체에서 하중과 처짐이 쌍곡선 함수의 관계가 있으며 이때의 점근선을 극한하중이라 하였으며<sup>(19)</sup>,

Kondner<sup>(18)</sup>는 점토의 삼축압축시험에서 이를 점토의 극한강도라 하였고 Chin<sup>(12)</sup>은 이를 말뚝의 극한지지력으로 정의하였다.

그러나 식(1)의 기울기  $b$ 가 같고 절편  $a$ 가 서로 다른 경우에 있어서 P-S곡선은 곡선의 형태가 서로 다르게 나타날지라도 점근선이 동일하기 때문에 극한하중이 동일하게 되는 문제점이 있다.

따라서 황정규 등<sup>(9)</sup>은 이러한 문제를 해결하기 위하여 쌍곡선의 최대곡률점을 파괴점으로 한 지지력 추정 방법을 식(2)와 같이 제안한 바 있으며, 이는 그림2와 같다.

$$P_f = \frac{1 - \sqrt{a}}{b} \quad (2)$$

$$S_f = \sqrt{a} \cdot \frac{(1 - \sqrt{a})}{b}$$

여기서  $P_f$ 는 P-S곡선에서 최대곡률점의 파괴하중,  $S_f$ 는 파괴하중시의 침하량으로 정의하였으며, 그림2에서 점 B는 파괴점, X 및 Y축은 쌍곡선의 점근선에 해당된다.

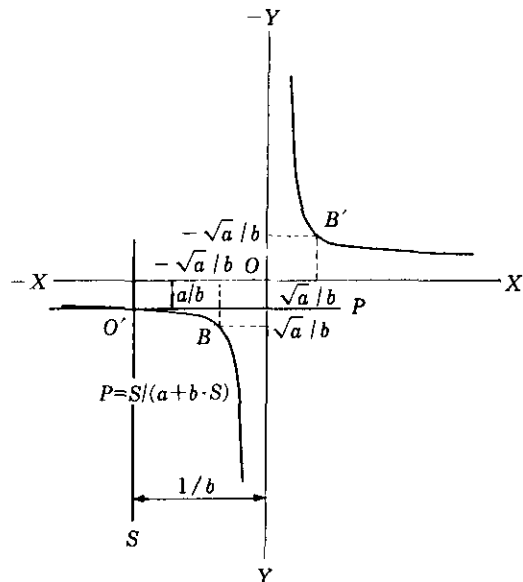


그림 2. 최대곡률 방법에 의한 파괴하중<sup>(9)</sup>

### 3. 안전율의 결정

吉成<sup>(11)</sup>은 항복하중을 말뚝의 P-S거동이 탄성상태에서 소성상태로 이행될 때의 하중으로서 하중 증가에 대한 침하량의 증분이 현저하게 증가하기 시작할 때의 하중이라고 정의하였으며, 沈<sup>(10)</sup>은 극한하중을 미소한 하중의 증가에 대하여 침하량의 증가가 무한히 크게 발생하는 하중이라고 정의하였는데 이러한 극한하중에 대응하는 의미로서 Crowther<sup>(17)</sup>는 파괴하중을 특정한 기준을 초과하였을 때의 하중으로 정의하였다.

최대곡률 방법의 파괴하중은 역학적 의미의 극한하중과 항복하중의 사이에 있는 하중으로서 Crowther가 정의한 바와 같이 극한하중에 대응하는 의미로 파괴하중이라 하였다.

홍원표 등<sup>(8)</sup>은 장기허용하중을 결정하는데 있어서 극한하중의 안전율은 3, 항복하중의 안전율은 2를 쓰고 있으나 파괴하중에 있어서는 일정한 안전율이 없으므로 여기서 최대곡률 방법에 의한 파괴하중의 안전율을 결정하고자 한다.

안전율을 결정하기 위하여서는 항복치 또는 극한치까지 재하한 시험자료들을 가지고 여러 방법에 의하여 허용하중을 구하고, 이를 비교·분석하는 것이 가장 바람직하나 이러한 재하 시험 결과치를 구한다는 것은 용이한 일이 아니다.

본 논문에 사용된 연직재하시험 결과치는 이와 같이 항복치 또는 극한치까지 재하한 시험 자료들로서 독일의 표준인 DIN 4014와 최근에 널리 사용되어지고 있는 Davisson 방법<sup>(17)</sup>에 의한 파괴하중 및 Chin의 방법에 의한 극한하중과 비교·분석하고 안전율 2.0인 Davisson의 방법과 DIN 4014 표준으로부터 최대곡률 방법에 의한 파괴하중의 안전율 2.5를 결정하였다.

DIN 4014는 침하량 20mm일 때의 하중을 극한하중이라고 규정하고 있으나 본 논문에서는 전술한 정의에 따라 파괴하중이라 하였다.

Davisson의 방법은 그림3과 같이 말뚝의 탄

성변형량  $\Delta$ 에 말뚝선단의 지반침하량  $X$ 를 더한 침하량에 해당되는 하중을 파괴하중  $P_f$ 라고 하고 안전율을 2.0으로 제안하였는데 이를 식으로 나타내면 식(3)과 같다.

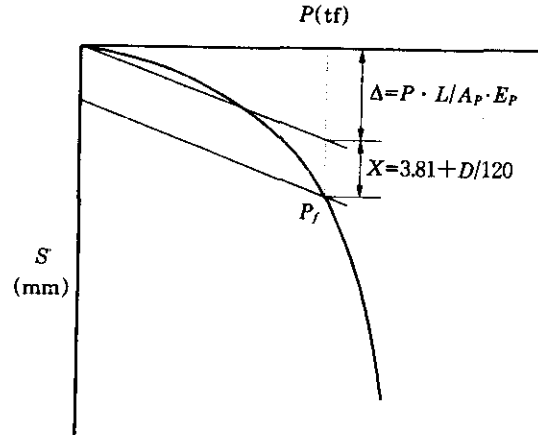


그림 3. Davisson의 방법<sup>(17)</sup>

$$S = \Delta + X = \frac{P \cdot L}{A_p \cdot E_p} + (3.81 + \frac{D}{120}) \text{ (mm)} \quad (3)$$

여기서  $S$ 는 말뚝머리의 전침하량이며,  $L$ 은 말뚝길이,  $A_p$ 는 말뚝의 단면적,  $E_p$ 는 말뚝의 탄성계수,  $D$ (mm)는 말뚝직경이다.

주어진 자료들에 대하여 종래의 도해적 방법인 Van der Veen의 방법, Fuller and Hoy의 방법, Mazurkiewicz의 방법,  $S - \log P$  방법,  $\log P - \log S$  방법 및 시간  $T$ 에 대한  $S - \log T$  방법 등에 의한 극한하중, 항복하중 또는 파괴하중을 구하였으나 도해적 방법에 의한 값들은 객관적인 값을 얻기가 어려워 본 논문에서는 제외하였다.

### 4. 분석 및 고찰

본 논문에 사용된 연직재하시험 결과치는 항복치 또는 극한치까지 재하한 시험 자료들로서 Y현장<sup>(7)</sup>의 27개의 시험말뚝 중 5개의 강관말뚝, K현장<sup>(3)</sup>의 6개의 시험말뚝 중 4개의 PC말

뚝, G현장<sup>(5)</sup>의 4개의 시험말뚝 중 4개의 H말뚝, N현장<sup>(2)</sup>의 2개의 시험말뚝 중 2개의 현장 타설 콘크리트말뚝, H현장<sup>(1)</sup>의 20개의 시험말뚝 중 2개의 강관말뚝 및 D현장<sup>(4)</sup>의 5개의 시험말뚝 중 1개의 강관말뚝 등 합계 18개의 자료이다.

이 자료들은 DIN 4014의 기준 침하량 20mm를 초과하고 Davisson의 방법에 따라 파괴하중을 구할 수 있으며, S-S/P의 상관성이 0.9 이상인 재하시험 결과치만 선택하여 분석

하였다.

DIN 4014를 택한 이유는 한계침하량치가 20mm로 비교적 작은 편이어서 재하시험 결과치에서 지지력을 추정하기가 용이하였을 뿐만 아니라 DIN 4014의 지지력 값이 대체로 안전측에 있다고 판단되었기 때문에 하한치로 간주하고 선택하였다.

Davisson 및 DIN 4014에 의한 파괴하중과 Chin의 극한하중 그리고 최대극률 방법에 의한 파괴하중은 표1과 같다.

표 1. 파괴하중과 극한하중

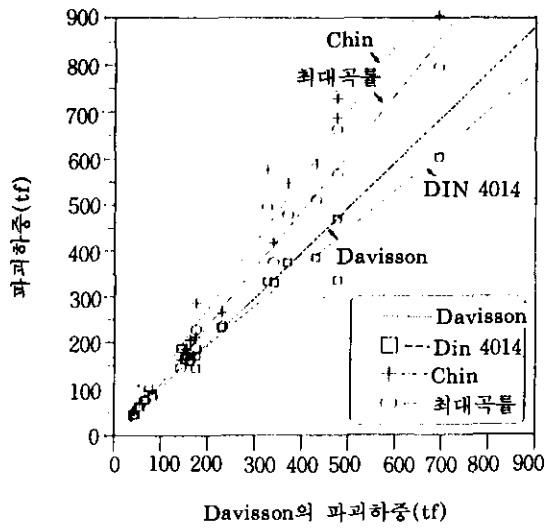
Site	시험번호	항경(mm)	Davisson(tf)	DIN4014(tf)	Chin(tf)	최대극률(tf)	비고
Y현장	No. 5	558.8	430	385	589	510	
	No.12	711.2	692	603	903	795	
	No.19	558.8	370	374	547	479	
	No.23	406.4	175	171	286	228	
	No.26	558.8	475	335	687	568	
K현장	No. 2	350.0	41	45	52	43	
	No. 3		82	86	96	83	
	No. 4		54	62	71	58	
	No. 5		66	77	97	76	
G현장	T-10(1)	364× 381× 24×24	154	171	186	165	
	T-10(2)		174	144	211	187	
	T-9		142	187	163	145	
	F-9		229	232	265	235	
N현장	No. 1	1500.0	325	332	576	494	
	No. 2	1500.0	475	470	728	662	
H현장	No. 2	406.4	44	46	54	40	
	No.16	406.4	162	159	205	163	
D현장	No. 4	900.0	340	330	417	375	

Davisson의 방법은 여러 연구에 의하여 훌륭한 방법으로 평가되고 있으므로<sup>(17)</sup> 이들 자료를 Davisson의 방법에 의한 파괴하중을 기준으로 그림4와 같이 점산도를 작도하고 회귀분석을 실시하였으며, r은 상관계수이다.

그림4에서 보는 바와 같이 Davisson의 파괴하중을 기준으로 18개의 재하시험 결과에서 각 방법들에 의한 파괴하중 또는 극한하중을 구하

여 회귀분석하면 최대극률 방법에 의한 파괴하중은 Davisson의 파괴하중보다 25%정도 크며, Din 4014의 파괴하중보다는 47%가 크고 Chin의 방법에 의한 극한하중보다는 14% 정도 작게 나타난다.

Chin의 하중은 점근선 값으로써 전술한 정의에 충실한 극한하중 값이며, Davisson의 파괴하중은 말뚝의 P-S 거동이 탄성상태에서



DIN 4014 :  $Y=0.85X+25.7(r=0.96)$   
 Chin :  $Y=1.42X-8.0 (r=0.97)$   
 최대곡률 :  $Y=1.25X-13.0(r=0.97)$

그림 4. 파괴하중과 극한하중의 점산도에 의한 회귀분석

소성상태로 이행될 때의 하중 값인 항복하중에 근접하고 있기 때문에 최대곡률 방법에 의한 파괴하중은 극한하중과 항복하중의 사이에 존재함을 알 수 있다.

그림4에 의하면 DIN 4014의 하중은 지지력이 큰 대구경 말뚝에서는 Davisson의 하중값보다 더 작은 상태를 나타내지만 100ton이하의 지지력이 작은 말뚝인 경우에는 침하량 20mm 일 때의 하중이 극한하중에 근접하므로 침하량의 기준으로 정의된 경우에는 항복 또는 극한 상태를 규정하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

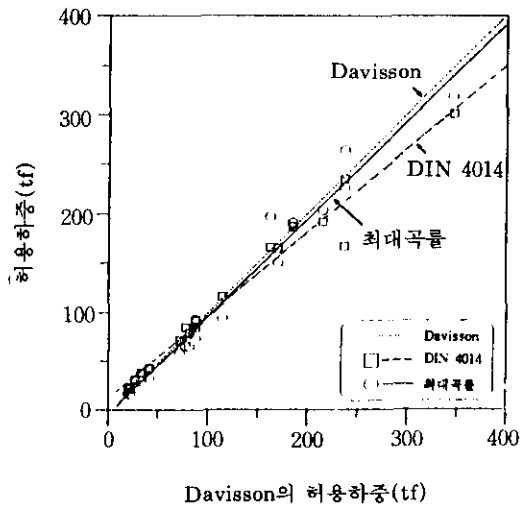
표2는 Davisson 및 DIN 4014에 의한 허용하중을 구한 것이며, Chin의 방법은 안전율이 명확치 않아 본 논문에서는 제외하였다.

최대곡률을 이용한 방법의 안전율을 결정하기 위하여 안전율  $F_s$ 를 2.0, 2.5, 3.0으로 가정하고 이들의 허용하중을 구하여 Davisson 및 DIN 4014에 의한 허용하중과 비교·분석하였으며, 그림5는 최대곡률 방법에 안전율 2.5를 적용한 경우이다.

표 2. 허용하중

Site	시험번호	항경 (mm)	Davisson (tf) $F_s = 2.0$	DIN4014 (tf) $F_s = 2.0$	최대곡률(tf)			비고
					$F_s = 2.0$	$F_s = 2.5$	$F_s = 3.0$	
Y현장	No. 5	558.8	215	192	255	204	170	
	No.12	711.2	346	301	397	318	265	
	No.19	558.8	185	187	239	191	159	
	No.23	406.4	87	85	114	91	76	
	No.26	558.8	237	167	284	227	189	
K현장	No. 2	350.0	20	22	21	17	14	
	No. 3		41	43	41	33	27	
	No. 4		27	31	29	23	19	
	No. 5		33	38	38	30	25	
G현장	T-10(1)	364× 381× 24×24	77	85	82	66	55	
	T-10(2)		87	93	93	74	62	
	T-9		71	72	72	58	48	
	F-9		114	116	117	94	78	

N현장	No. 1	1500.0	162	166	247	197	164	
	No. 2	1500.0	237	235	331	264	220	
H현장	No. 2	406.4	22	23	20	16	13	
	No.16	406.4	81	79	81	65	54	
D현장	No. 4	900.0	170	165	187	150	125	



$$\text{DIN 4014 : } Y=0.85X+12.4(r=0.97)$$

$$\text{최대극률 : } Y=1.00X-5.27(r=0.97)$$

그림 5. 허용하중의 점산도에 의한 회귀분석  
(최대극률의  $F_S=2.5$ )

최대극률 방법의 안전율이 2.0일 때는 Davisson의 허용하중보다 10%정도, DIN 4014의 허용하중보다 21%정도 과대평가된 상태이나 안전율이 3.0일 때는 DIN 4014의 허용하중보다 20%정도, Davisson의 허용하중보다 32%정도 과소평가 되었다.

그림5는 최대극률 방법의 안전율이 2.5일때의 허용하중으로 Davisson의 허용하중보다 다소 작으나 근사한 값을 나타내며, DIN 4014의 허용하중보다는 12%정도 큰 값을 나타내고 있다.

따라서 Davisson의 방법 뿐만 아니라 DIN 4014인 20mm의 침하량 기준으로 지지력을 구하지 못하는 대구경 말뚝의 연직재하시험에 있어서는 최대극률을 이용한 방법으로 지지력

을 추정하여 파괴하중을 구하고, 안전율을 2.5로 하여 허용하중을 결정하는 방법은 타당성이 있는 것으로 판단되었다.

최대극률 방법에 의한 허용하중을 실제 설계에 적용하기 위해서는 많은 재하시험 결과치에 의하여 검토되어야 할 것이며, 이는 장차의 연구 과제이다.

## 5. 결 론

본 논문의 결론은 다음과 같다.

- 1) 대구경이며 지지력이 큰 말뚝으로 재하시험의 결과가 항복하중이나 극한하중이 나타나지 않을 뿐만 아니라 Davisson의 방법 및 DIN 4014의 20mm의 기준치도 적용할 수 없는 재하시험 결과치에 대한 지지력의 추정은 최대극률 방법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.
- 2) 18개의 말뚝재하시험 결과에 의하면 최대극률 방법에 의한 파괴하중은 Davisson의 파괴하중보다 25%정도 크고 Chin의 방법에 의한 극한하중보다는 14%정도 작게 나타났다. 최대극률 방법에 의한 파괴하중은 항복하중과 극한하중 사이에 존재하였다. 여기서 파괴하중은 특정한 기준을 초과하였을 때의 하중으로 정의하였다.
- 3) 항복하중 또는 극한하중까지 재하시킨 18개의 연직재하시험말뚝을 분석한 결과 최대극률 방법의 안전율 2.5에 의한 허용하중은 독일의 기준인 DIN 4014에 의한 허용하중보다 12%정도 크게 나타났으며, Davisson의 방법에 의한 허용하중보다는 다소 작으나 근사한 값을 나타내어 제안

된 안전율 2.5는 타당성이 있는 것으로 판단되었다.

- 4) 최대극률 방법에 의한 허용하중을 실제 설계에 적용하기 위해서는 많은 재하시험 결과치에 의하여 검토되어야 할 것이며 이는 장차의 연구 과제이다.

### 참 고 문 헌

1. 고려기초연구소,(1992) H현장 말뚝재하시험 보고서,
2. 고려기초연구소,(1993) N현장 말뚝재하시험 보고서,
3. 고려기초연구소,(1994) K현장 말뚝재하시험 보고서,
4. 농업진흥공사,(1988) D현장 기초항 설계 및 시공,
5. 대림산업기술연구소,(1981) G현장의 Pile Load Test Report,
6. 류정수, 김석열,(1990) "말뚝의 연직재하시험에 의한 지지력 결정에 관한 연구", 한국농공학회지, 제31권, 제2호, pp.101~110.
7. 포항종합제철,(1984) Y현장 기초항타 및 재하시험 보고서,
8. 홍원표, 양기석, 이장오, 성안재, 남정만,(1989) "관입말뚝에 대한 연직재하시험시 항복하중의 판정법", 대한토질공학회, 제5권 제1호, pp.7~18.
9. 황정규, 류정수,(1993) "말뚝재하시험에서 최대극률을 이용한 지지력 추정", 대한토목학회논문집, 제13권, 제3호, 1993, pp.155~161.
10. 沈保漢,(1983) "中國における 場所打ちコンクリート杭の鉛直支持力の評價", 土と基礎, 第31卷, 第12號, pp.57~64.
11. 吉成元伸,(1975) "載荷試験から支持力を判定するうえでの問題點", 土と基礎, Vol 23, No.7, 27~33.
12. Chin, F.K.,(1970) "Estimation of the Ultimate Load of Piles from Tests not Carried to Failure", Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, Singapore, pp.81~90.
13. Chin, F.K., Discussion,(1970) "Pile Tests - Arkansas River Project", Journal SMFD, ASCE, Vol.97, SMG, pp.930~932.
14. Chin, F.K.,(1972) "The Inverse Slope as a Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Piles", Proceedings of the 3rd Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, Hong Kong, pp.83~91.
15. Chin, F.K.,(1973) "Behavior of Piles in Alluvium", Proceedings of the 8th ICSMFE, Vol. 21, Moscow, pp.47~52.
16. Chin, F.K.,(1978) "Diagnosis of Pile Condition", Geotechnical Engineering, Vol.9, pp. 85~104.
17. Crowther, C.L.,(1988) Load Testing of Deep Foundations, John Wiley & Sons, Singapore, 1988, pp.136~137, pp. 153~176.
18. Kondner, R.L., (1963) "Hyperbolic Stress - Strain Response: Cohesive Soils", Journal SMFD, ASCE, Vol.89, No.SM1, pp.115~143.
19. Timoshenko, S.P.,(1963) Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, pp.190~192.

(접수일자 1994. 11. 24)