

말뚝의 動的 支持力 公式의 統計的 分析

— 새로운 公式의 評價를 위하여 —

A Statistical Analysis on Dynamic Pile-Driving Formulas

— For Evaluation of the New Formula —

黃 正 奎*
Hwang, Jung Kyu

Abstract

A new dynamic pile-driving formula derived by the writer, in which the mechanics of stress waves and the effect of residual stresses were considered for more accurate prediction of the load carrying capacity of piles, was compared with other representative formulas through statistical analysis using the load test results.

As the result, the new formula was estimated as highly accurate and reliable, with its safety factor less than 3.

要 旨

말뚝의 動的 支持力을 더욱 正確하게 推定하기 위하여 波動理論과 殘留應力을 考慮하여 誘導된 筆者의 새로운 公式을 말뚝의 載荷試驗資料를 利用하여 統計的 分析 方法으로 다른 代表的 公式과 比較하여 評價하였다.

그 結果, 새로운 公式은 그 安全率이 3 以下이며, 比較的 精確度가 높은 것으로 評價되었다.

1. 序 言

말뚝의 動的 支持力 公式은 그 類型이나 수효가 매우 많지만 말뚝의 材質 및 規格과 樁머의 機種 및 容量의 變遷으로 時代와 地域에 따라 各其 適切한 公式을 選擇的으로 使用하여 왔다.

昨今과 같이 점차 말뚝의 規格이 커지고 材質이 堅固해짐에 따라 차츰 樁머는 能率的인 機種을 選好하게 되었으며 그 容量은 大型化하기에 이르렀으므로 말뚝의 支持力公式도 從前과 같이 樁머-말뚝-흙의 複合的 相互作用을 可及的 單純

化하여 導出한 簡單한 形式의 公式으로는 正確한 支持力을 推定하기 어렵게 되었다.

이러한 背景에서 筆者는 말뚝의 動的 支持力을 效果的으로 推定하기 위하여 樁머-말뚝-흙의 複合的 相互作用을 波動理論^(3,7)과 殘留應力^(9,13)의 概念을 導入하여 解析한 새로운 公式⁽⁴⁾을 提案한 바 있으나 本 研究에서는 이 새로운 公式을 統計的 分析 方法^(10,11)을 통하여 考察하고 一般的으로 널리 알려진 代表的인 支持力 公式과 比較檢討함으로써 새로운 公式을 評價하고자 한다.

*正會員·京畿大學 土木工學科 教授

表 1. 말뚝의 動的 支持力公式 一覽表

公 式 名	公 式 (단위 : kg, cm)
Hiley	$R = \frac{e_f \cdot E_n}{s + \frac{1}{2}(c_1 + c_2 + c_3)} \cdot \frac{W + W_p \cdot e^2}{W + W_p}$
Canadian National Building Code(CNBC)	$R = \frac{A}{\left(\frac{l}{E} + 0.0036\right)} \left[-s + \sqrt{s^2 + \frac{2}{A} \left(\frac{l}{E} + 0.0036\right) e_f \cdot E_n \cdot \frac{W + W_p \cdot e^2}{W + W_p}} \right]$
Pacific Coast Uniform Building Code(PCUBC)	$R = \frac{A \cdot E}{2l} \left[-s + \sqrt{s^2 + \frac{4l}{A \cdot E} \cdot e_f \cdot E_n \cdot \frac{W + W_p \cdot e^2}{W + W_p}} \right]$
Eytelwein	$R = \frac{E_n}{s \left(1 + \frac{W_p}{W}\right)} \quad (\text{Drop hammer})$ $R = \frac{E_n}{s + 0.25 W_p / W} \quad (\text{Steam hammer})$
Engineering News(EN)	$R = \frac{E_n}{s + 2.5} \quad (\text{Drop hammer})$ $R = \frac{E_n}{s + 0.25} \quad (\text{Steam hammer})$
筆者의 새로운 公式(本公式)	$R = \frac{e_f \cdot E_n}{\alpha + \beta}$ $\alpha = s \left(1 + \frac{W_p}{W}\right)$ $\beta = \delta(1 + \lambda) \frac{L}{c'} \sqrt{\frac{e_f \cdot E_n}{W}} \quad \begin{matrix} (100\% \text{ 摩擦말뚝 } \delta=1) \\ (50\% \text{ 摩擦말뚝 } \delta=0.7) \\ (100\% \text{ 支持말뚝 } \delta=0) \end{matrix}$

2. 代表的인 支持力公式 및 새로운 公式

本 研究에서 比較 評價될 代表的인 말뚝의 動的 支持力公式과 筆者가 提案한 새로운 公式⁽¹⁴⁾ (以下 本公式이라 함)은 表 1과 같다.

Hiley 公式은 Newton의 衝擊理論을 導入하여 에너지 保存法則으로 解析한 公式으로서 當初에는 英國에서 使用되어 왔으나 차츰 歐美各國에서도 使用되기에 이르러 가장 一般화된 公式이며, Canadian National Building Code 公式(以下 CNBC 公式이라 함) 및 Pacific Coast Uniform Building Code 公式(以下 PCUBC 公式이라 함)은 歐美 各國에서 Redtenbacher 公式과 함께 널리 使用되는 公式으로서 말뚝을 彈性體로 假定하여 導出된 公式이다.

Eytelwein 公式은 型式이 간단하여 歐洲 各國에서는 Dutch 公式과 함께 廣範圍하게 使用되고 있으며 말뚝을 非彈性體로 假定한 公式이고, Engineering News 公式(以下 EN 公式이라 함)은

그 形態가 매우 간단하므로 오랫동안 美國에서 널리 使用되어온 公式이다.

本 公式은 波動理論으로 말뚝의 支持力을 解析하는 한편 종전에는 그 重要性을 소홀히 한 말뚝의 殘留應力의 影響을 考慮하여 誘導된 公式으로서 말뚝의 支持力에 影響을 미치는 여러 가지 複合의 要因들을 잘 나타내고 있는 公式으로 본다⁽¹⁴⁾.

3. 載荷 試驗 및 杭打資料

本 研究에서 統計的 分析에 使用된 載荷試驗 및 杭打資料는 Chellis(1961)⁽²⁾에 의하여 蒐集된 資料로서 그중 나무말뚝 13本, Monotube 鋼말뚝 3本, 鋼管말뚝 3本, H型鋼말뚝 21本, 合計 40本の 말뚝의 資料만 使用하였다.

나무-鋼管·合成말뚝 1本 및 프리케스트 콘크리트 말뚝 2本の 資料는 材質別 本數가 너무 적어서 利用할 수 없었으며, H型鋼말뚝 2本の 資料는 最終打擊時의 打込깊이가 零으로 記錄되어

있어 利用하지 않았다.

Chellis가 蒐集한 資料에는 다음 14가지 事項이 記錄되어 있다. (1) 調査位置, (2) 말뚝의 種類, (3) 말뚝의 길이, (4) 말뚝의 貫入깊이, (5) 말뚝머리의 폭, (6) 말뚝끝의 폭, (7) 最終 打擊時의 打込깊이, (8) 햄머의 機種, (9) 램의 落下높이 또는 1分當 打擊回數, (10) 켈의 重量(一部), (11) 말뚝의 重量(一部), (12) 載荷試驗時의 破壞荷重, (13) Hiley 公式를 爲始한 8個 公式에서 計算된 말뚝의 極限 支持力의 값, (14) 地盤土의 深度別 土質狀態, (15) 資料 提供者.

그리고 이들 資料의 內譯은 다음과 같다. (1) 말뚝의 重量은 나무말뚝 780 lb~3,700 lb, monotube 鋼말뚝 1,100 lb~1,500 lb, 鋼管말뚝 3,100 lb~3,250 lb, H型鋼말뚝 1,620 lb~7,200 lb이며, (2) 햄머의 機種은 나무말뚝 2本에 대하여 Drop hammer를 使用한 以外에는 全部 Steam hammer를 使用하였으며, (3) 載荷試驗時의 破壞荷重은 나무말뚝의 경우는 71 ton, 鋼말뚝의 경우는 150 ton을 超過하지 않았고, (4) 地盤土의 土質狀態는 3本의 말뚝을 除外하고는 全部가 非粘着性인 砂質土層이며 간혹 粘着性 土層이 中間에 挿入되어 있을 뿐이었다.

이 資料에서 明示되지 않거나 漏落된 重要 情報들은 (1) 햄머의 效率, (2) 쿿손브록의 材質 및 두께, (3) 켈의 重量(一部), (4) 反撥係數, (5) 말뚝의 重量(一部), (6) 말뚝, 쿿손 및 흙의 彈性壓縮量, (6) 載荷試驗의 荷重-沈下量圖 등이다.

以上과 같은 資料를 使用하여 各公式에서 말뚝의 極限支持力을 計算함에 있어서 Hiley, CNBC, PCUBC, Eytelwein 및 EN 公式의 計算値는 便宜上 Chellis의 計算値를 그대로 使用하고, 本公式의 計算値는 直接 算出하였다.

그 結果, 各 公式에서 計算된 말뚝의 極限 支持力의 값 R (以下 計算値라 함)과 載荷試驗時의 破壞荷重 R_c (以下 試驗値라 함)를 말뚝별로 表示하면 表 2와 같다.

4. 統計的 分析方法

表 2에서 보는 바와 같이 試驗値와 計算値는 一致하지 않는다. 그 原因은 (1) 油壓작키의 內部 摩擦, 計測裝置의 不正確 및 不適當한 設置方法, 破壞荷重 決定時의 解析方法의 差異 등으로 인한 試驗値의 誤差, (2) 最終 打込時의 打込깊이, 햄머의 打擊條件(램의 落下높이 또는 1分當 打擊回數), 말뚝의 諸元 등의 測定誤差, (3) 햄머의 效率, 말뚝의 彈性係數, 말뚝의 單位體積 重量 등 各種係數의 假定으로 인한 計算値의 誤差, (4) 말뚝박기에서 일어나는 複合的인 現象을 支持力公式이 充分히 表現하지 못하는 데서 오는 誤差 등이다.

이와 같이 一括的으로 解析하기가 困難하며 修正 不可能한 複合的 誤差要因을 갖는 서로 相關되는 두 變數의 關係를 分析하는 方法으로서 一般的으로 統計的 方法이 適用된다.

4.1 公式 安全率의 決定

表 2로부터 公式別로 試驗値를 橫軸으로 하고 計算値를 縱軸으로 하여 點散圖(Scatter Diagram)를 그리면 그림 1~6과 같다. 萬若 理想的으로 試驗値가 測定되고 計算値가 算出되었다면 이 點

表 2. 試驗値 및 計算値 對比表

試驗 番號	試驗値 R_c (ton)	計 算 値 R (ton) ⁽²⁾					
		Hiley	CNBC	PCU BC	Eytel- wein	EN	本公式
나 무 말 뚝							
1	45	45	45	47	52	88	35
2	28	17	21.3	24.5	24.6	28.5	13
3	25	18	22	23	42	40	18
4	44	37.5	49	47	85	81	34
5	40	43.5	57	52.5	98	94	37
6	40	23	22	22.5	54	58	17
7	40	23	25.5	26	63	68	19.5
8	71	68	75	71	148	150	73
9	40	28	27	27	73	78	21.5
10	43	34.5	34.5	32	95	98	25.5
11	37	45	49	48	105	87	47
12	45	50	53	51	144	109	45.5
13	40	44.5	43.5	39	147	170	38.5
Monotube 鋼 말 뚝							
14	88	94	50	100	206	166	103
15	78	72	46	76	174	146	72
16	88	83	48	93	177	146	88

鋼管 말뚝

17	46	38	53	79	164	194	71.5
18	120	85	74	107	626	450	131
19	150	86	74	108	556	474	128

H型鋼 말뚝

20	56	42.5	38	48	78	76	32
21	44.5	42.5	38	48	78	76	32
22	45	50	40	54	88	86	36.5
23	55	55	42	57	92	90	37.5
24	67.5	54	52	61	104	100	42.5
25	45	60	50	71	118	114	48.5
26	79	62	50	71	118	114	48.5
27	45	61	50	71	118	114	58
28	67	61	50	71	118	114	58
29	89	72.5	48	84	154	141	60
30	88	65	57	78	210	244	47.5
31	78.8	80	57	100	171	162	81.5
32	112	80	57	100	171	162	68
33	70	92	84	152	291	243	100.5
34	75	79	66	100	353	336	98.5
35	90	83	67	100	360	472	71
36	80	84	70	104	372	492	73
37	99	75	60	72	244	194	88
38	140	89	69	108	444	636	82
39	150	92	72	110	496	729	86.5
40	140	93	75	114	504	755	88.5

散圖의 모든 點은 $R=R_s$ 의 直線에 打點될 것이며, 이 直線은 1의 기울기를 갖고 그 截片의 값은 零이 된다. 그러나 試驗值 및 計算值는 前述한 바와 같이 많은 誤差를 내포하고 있으므로 各 點은 어느 平均值를 中心으로 하여 一定한 範圍로 分布된다.

한편, 이때의 試驗值는 말뚝의 靜的 載荷試驗의 荷重-沈下量圖에서 찾아낸 降伏點의 荷重이므로 말뚝의 許容支持力 R_s 는

$$R_s = \frac{R_c}{2} \quad (1)$$

이 되며⁽¹⁵⁾, 또 한편 (1)式은 計算值를 一定한 安全率 F 로 나눈 값보다 커야 하므로

$$R_s = \frac{R_c}{2} \geq \frac{R}{F} \quad (2)$$

이 되고, (2)式에서

$$F \geq 2 \cdot \frac{R}{R_c} \quad (3)$$

이므로, 이는 곧 (3)式에서 R/R_c 의 가장 큰 값

을 구하면 安全率을 얻을 수 있다는 것을 알 수!

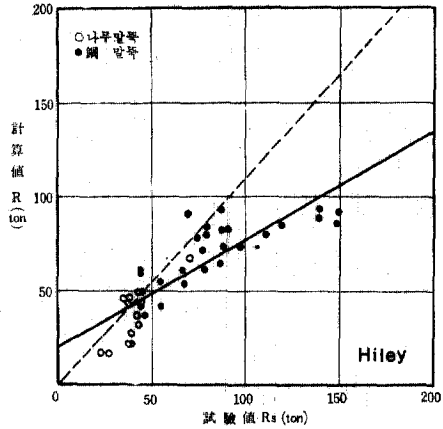


그림 1. 試驗值-計算值 關係圖(1)

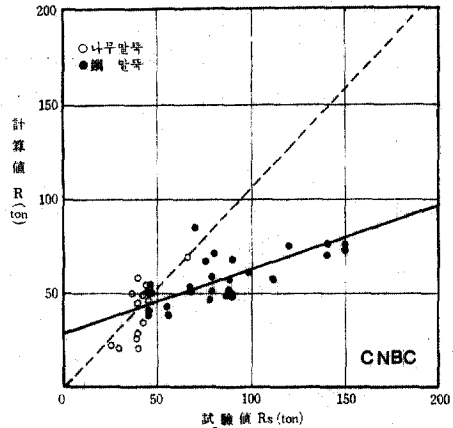


그림 2. 試驗值-計算值 關係圖(2)

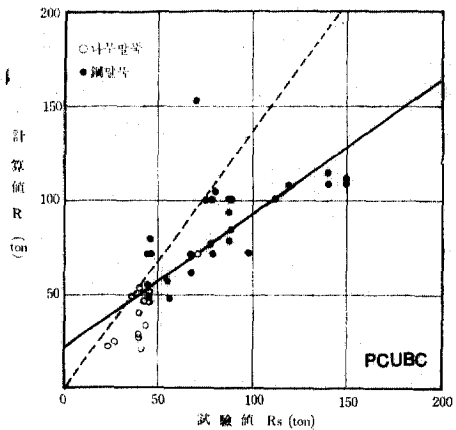


그림 3. 試驗值-計算值 關係圖(3)

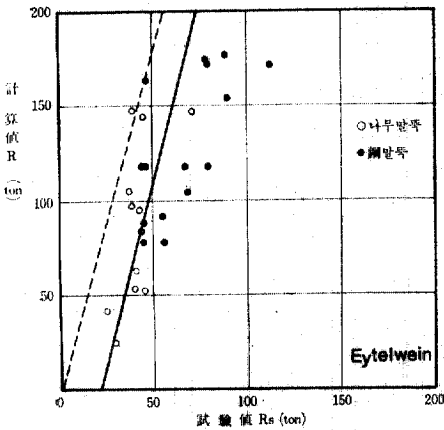


그림 4. 試驗值-計算值 關係圖(4)

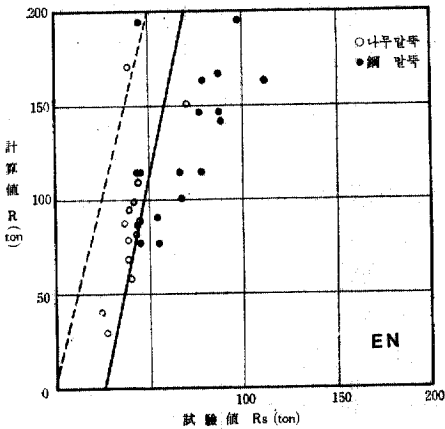


그림 5. 試驗值-計算值 關係圖(5)

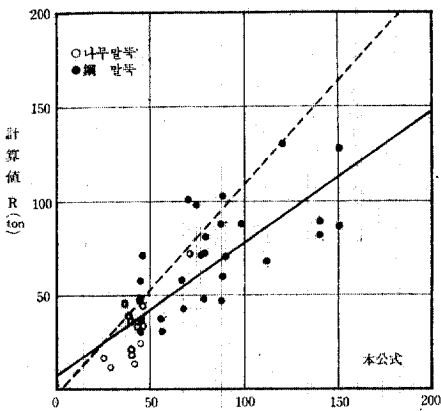


그림 6. 試驗值-計算值 關係圖(6)

있다. 여기에서 R/R_s 를 ϕ 라 두면 그 平均值 $\bar{\phi}$ 및 標準偏差 σ_ϕ 는 各各

$$\phi = \frac{R}{R_s} \quad (4)$$

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum \phi_i \quad (5)$$

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum(\phi_i^2) - \frac{1}{N} (\sum \phi_i)^2}{N-1}} \quad (6)$$

이 된다. 지금 點散圖上的 各 點의 分布狀態를 正規分布로 假定하면

$$\frac{R}{R_s} = \bar{\phi} + \sigma_\phi \quad (7)$$

를 上限으로 할 때에는 ϕ 의 값이 上限을 超過하는 確率은 約 15% 程度가 되며, 또 한편

$$\frac{R}{R_s} = \bar{\phi} + 2\sigma_\phi \quad (8)$$

$$\frac{R}{R_s} = \bar{\phi} + 3\sigma_\phi \quad (9)$$

를 上限으로 할 때에는 ϕ 의 값이 上限을 超過하는 確率은 各各 約 2.5% 및 約 0%이다^(10,11).

ϕ 의 값이 上限을 超過하는 確率이 0%인 上限을 使用하여 安全率을 구하는 것이 바람직하지만 말뚝은 大部分 群杭으로 作用하며 (2)式에서 試驗值에 安全率 2를 考慮하므로 非經濟的인 設計를 避하기 위하여 15%의 危險率을 감안한 (7)式을 分布의 上限으로 適用⁽¹⁵⁾하면, (3)式에서

$$F \geq 2(\bar{\phi} + \sigma_\phi) \quad (10)$$

를 얻으며, 그림 1~6의 點線은 (7)式의 값을 圖示한 것이다.

4.2 相關·回歸分析

그림 1~6에서 보는 바와 같이 點散圖上的 各 點은 $R=R_s$ 의 直線에 一致하는 密接한 關係는 아닐지라도 어떠한 方向과 어느 程度의 相關性을 가진 線型關係가 있을 것으로 推測된다. 이와 같이 두 事象間의 線型關係의 方向과 程度를 指數形式으로 規定하는 값을 相關係數라 하며 이를 γ 라 두면

$$\gamma = \frac{\frac{1}{N} \sum (R_{s,i} \cdot R_i) - \bar{R}_s \cdot \bar{R}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (R_{s,i}^2) - (\bar{R}_s)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum (R_i^2) - (\bar{R})^2}} \quad (11)$$

이코^(10,11), (11)式의 값은

$$-1 \leq \gamma \leq 1 \quad (12)$$

의 範圍에 있다. 이때에 γ 의 값이 $\gamma > 0$ 이면 正相關, $\gamma < 0$ 이면 逆相關, $\gamma = 1$ 이면 完全相關, $\gamma = 0$ 이면 無相關이라 한다.

또한 線型關係의 方向과 程度뿐 아니라 點散圖上에서 各點이 共通으로 關係를 갖는 가장 公平한 線型을 發見하여 이를 回歸線이라 하며 回歸線을 規定한 函數式을 回歸方程式이라 하여

$$R = A \cdot R_s + B \quad (13)$$

로 나타내고, A 를 回歸係數, B 를 截片이라 하여 各

$$A = \frac{\frac{1}{N} \sum (R_{s,i} \cdot R_i) - \bar{R}_s \cdot \bar{R}}{\frac{1}{N} \sum (R_{s,i}^2) - (\bar{R}_s)^2} \quad (14)$$

$$B = \bar{R} - A \cdot \bar{R}_s \quad (15)$$

로 나타낸다^(10,11). 그림 1~6의 太線은 (13)式의 線型을 各各 圖示한 것이다.

4.3 變動係數 · 累積頻度曲線

試驗值와 計算值는 서로 完全相關이 아니므로 $\frac{R}{R_s} = 1$ 의 直線上에 一致하지 않고 ϕ 를 中心으로 σ_ϕ 에 따라 分布되므로 같은 σ_ϕ 일 경우 ϕ 가 크면 各點이 分布하는 相對的 變動率은 작아진

다. 그러므로 變動比率을 規定하는 값을 變動係數라 하여 C 로 表示하면

$$C(\%) = \frac{\sigma_\phi}{\phi} \times 100 \quad (16)$$

로 나타낸다^(10,11).

그리고, 그림 4~5에서 보는 바와 같이 Eytelwein 및 EN 公式의 點散圖에서 R 의 값이 너무 큰 點은 圖上에 打點이 어려우므로 各點의 分布 狀態를 한 눈으로 把握할 수 없으며, 相關 · 回歸分析으로는 計算值의 過大(Overestimation) 혹은 過小(underestimation) 傾向을 쉽게 判斷하기 困難하므로 ϕ 의 값을 橫軸으로 하고 累積頻度百分率을 縱軸으로 하여 累積頻度曲線⁽⁶⁾을 그림 7과 같이 圖示하였다. 여기서 만약 두 變數가 完全正相關이면 曲線은 $\phi = 1$ 의 直線과 一致하고 過大計算值와 過小計算值가 같은 頻度이면 $\phi = 1$ 의 直線을 50%에서 截斷하고 過大 또는 過小의 程度가 크면 曲線은 점차 굽는 形狀이 된다.

5. 統計值의 比較

表 2의 資料를 나무말뚝과 鋼말뚝의 材質別로 나누어 (10), (11), (14), (15), (16)式의 값을 算

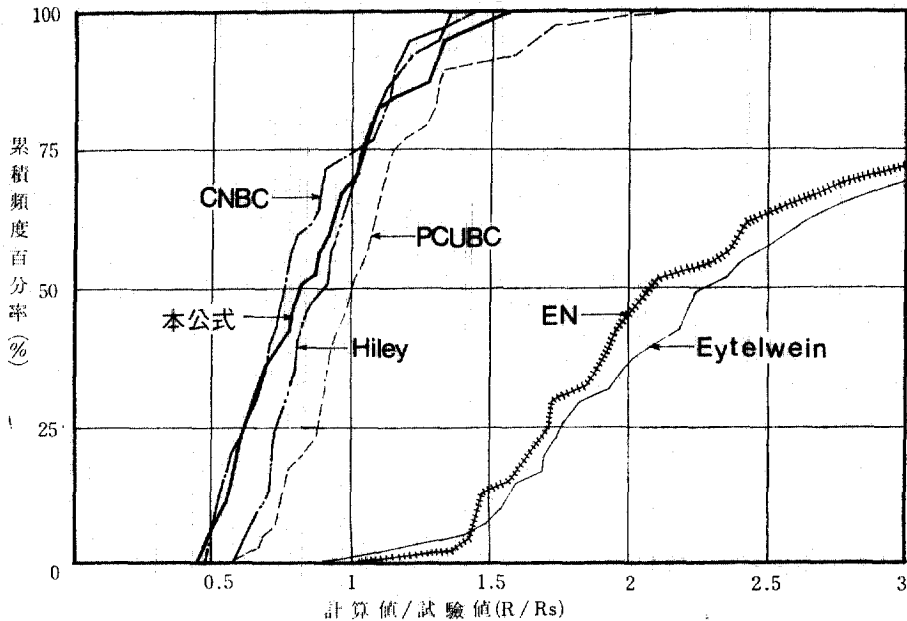


그림 7. 計算值/試驗值의 累積頻度曲線圖

表 3. 統計値의 比較表

말뚝材質	公 式 名	公稱安全率	安 全 率 F	變 動 係 數 C (%)	相 關 係 數 r	回 歸 係 數 A	截 片 B (ton)
나무말뚝	Hiley		2.2	26	0.82	1.13	-10
	CNBC		2.5	28	0.77	1.19	-9
	PCUBC		2.4	25	0.77	1.07	-5
	Eytelwein		5.8	39	0.64	2.43	-14
	EN		5.7	36	0.68	2.49	-14
	本公式		2.1	34	0.81	1.24	-19
鋼말뚝	Hiley		2.3	24	0.76	0.40	38
	CNBC		1.9	29	0.68	0.26	35
	PCUBC		2.9	31	0.62	0.46	48
	Eytelwein		7.7	41	0.82	4.09	-103
	EN		8.6	51	0.80	5.33	-191
	本公式		2.3	32	0.66	0.55	25
全體말뚝	Hiley	3	2.2	24	0.84	0.57	20
	CNBC	3	2.1	32	0.72	0.34	28
	PCUBC	4	2.7	30	0.78	0.71	21
	Eytelwein	6	7.2	42	0.86	3.87	-80
	EN	6	7.8	50	0.83	4.61	-121
	本公式	?	2.2	33	0.79	0.70	9

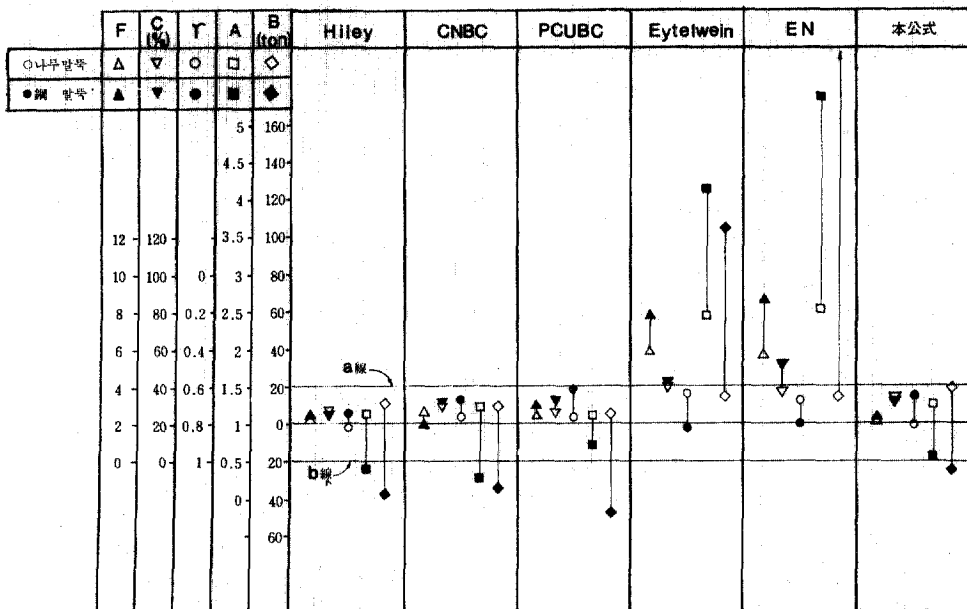


그림 8. 安全率, 變動係數, 相關係數, 回歸係數, 截片의 比較圖

出하여 이를 各 公式別로 比較하면 表 3과 같으며, 全體 말뚝의 回歸線, 分布의 上限線, 累積頻度曲線을 公式別로 圖示한 것이 各各 그림 1

~6의 太線 및 點線과 그림 7이다. 그리고 統計値의 比較를 쉽게 하기 위하여 安全率, 變動係數, 相關係數, 回歸係數 및 截片의 比較圖를

그림 8에 圖示하였다.

6. 考 察

本公式은 그림 6에서 보는 바와 같이 (1) 點散圖上的 各點의 分布狀態는 回歸線에 沿하여 比較的 集中的으로 分布되어 있으며, (2) 그 分布의 上限線의 기울기는 그다지 急하지 않고, (3) 回歸線의 線型은 $R=R$, 直線과 比較的 가까우며 (4) 그림 7에서 累積頻度曲線은 $\phi=1$ 의 縱線에 매우 沿接하여 있고, 이 縱線을 截斷하는 百分率은 67%를 크게 超過하지 않으며, ϕ 의 最小值 및 最大值는 0.5~1.5 範圍를 크게 넘지 않고 있다.

만약, 가장 理想的 狀態에서 試驗值와 計算值를 얻었다면 點散圖上的 各點은 $R=R$, 的 直線 上에 있으므로 安全率은 2, 變動係數는 0, 相關係數는 1, 回歸係數는 1, 截片은 0이 될 것이며 累積頻度曲線은 $\phi=1$ 의 縱線과 一致하게 될 것이다. 따라서 이들 統計值(表 3)는 計算值를 算出 한 말뚝의 支持力公式 自體의 精確度와 信賴性 을 評價하는 尺度로 活用되고 있다.

既往의 研究報告^(1,4,6,8,12,15)에서 매우 精確度 가 높고 信賴性이 큰 支持力公式의 統計值를 檢討하여 보면, 대략 安全率은 4未滿, 變動係數는 60%未滿, 相關係數는 0.6以上, 回歸係數는 0.5~1.5의 範圍, 截片은 回歸係數가 0.5~1인 경우에는 0~20, 回歸係數가 1~1.5인 경우에는 0~20의 範圍內에 있으며, 累積頻度曲線이 $\phi=1$ 의 縱線을 截斷하는 百分率이 中央三等分(33~67%) 範圍內에 있고, ϕ 의 값의 範圍는 0.5~1.5인 것으로 나타난다.

以上과 같은 統計值를 評價 基準으로 假定할 때에 公式의 모든 統計值가 그 基準에 合致하면 그 公式은 매우 精確度가 높고 信賴性이 큰 것으로 評價할 수 있다.

그림 8에서 보는 바와 같이 a線과 b線 사이에 모든 統計值가 있으면 그 公式은 매우 滿足 할만 하며 이들 兩線範圍에서 크게 벗어나면 그 精確度나 信賴性이 떨어지는 것이므로 本公式은 比較的 精確度가 높고 信賴性이 큰 公式으로 評價된다.

또 한편, 그림 1~5, 7, 8에서 보는 바와 같이 Hiley, CNBC, 및 PCUBC 公式 등은 比較的 的 精確度가 높고, Eytelwein 및 EN 公式 등은 매우 낮은 편이며 支持力의 값이 큰 領域에서는 그 計算值가 過大值를 나타내는 傾向이 있는 것으로 判斷된다.

그러나 本 研究에서 使用된 載荷試驗 및 抗打 資料는 다음과 같은 理由로 完璧한 統計的 分析 資料로서는 다소 미흡한 것으로 思料된다. (1) 나무말뚝의 資料는 단지 13本으로서 統計值를 材質別로 分析하기에는 信憑性이 작다. (2) 말뚝材料로서 利用率이 높은 프리캐스트 콘크리트 말뚝의 資料가 없으므로 公式을 總括的으로 評價하는 것은 어렵다. (3) Diesel hammer 의 活用度가 漸次 높아지는 이때에 이에 該當하는 資料가 없어 이의 統計值에 미치는 影響分析이 不可能하다. (4) 말뚝의 規格이 大型化하고 材質이 堅固하여 짐에 따라 말뚝의 支持力의 크기도 漸次 增大되고 있음을 감안할 때 支持力의 最大 值가 150 ton 以下인 資料는 다소 미흡하다고 思料된다.

그림에도 불구하고 總 40本의 말뚝資料는 蒐集하기 어려운 貴重한 資料로서 말뚝의 支持力 公式에 대하여 概略的인 精確度를 評價하는 데 에는 充分한 것으로 判斷된다.

將次 上記와 같은 미흡한 事項이 補完된 資料를 具備하여 本 公式을 보다 完璧하게 分析評價하는 것이 必須的인 研究課題이며, 이에 따라 必要하다면 本 公式의 修正方案⁽⁶⁾을 模索할 수 있을 것으로 본다.

7. 結 論

本 研究의 結果로 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

(1) 多數의 載荷試驗 및 抗打資料에서 얻어진 말뚝의 支持力 公式의 統計值들은 그 公式의 精確度를 評價하는 데에 있어서 매우 重要한 情報들을 提供한다.

(2) 本 公式은 比較的 的 精確度가 높은 것으로 判斷되며, 이 公式의 安全率은 3以下이고, 試驗值와 計算值間의 相關性이 높으며, 그 回歸

線은 매우 良好하고, 點散圖上의 分布의 變動係數도 낮으며 그 分布範圍도 比較的 작은 것으로 評價된다.

(3) Hiley, CNBC 및 PCUBC 公式 등은 그 精確度가 本 公式와 大體로 同等한 水準인데 反해 Eytelwein 및 EN 公式 등은 精確度가 매우 낮고 支持力의 값이 큰 領域에서는 그 計算值가 過大 值를 나타내는 傾向이 있다.

(5) 本 研究에서 使用한 載荷試驗 및 杭打資料는 그 수효나 內容이 다소 미흡하여 말뚝의 支持力 公式에 대한 概略的인 分析評價는 可能하나 完璧한 統計的 分析은 어렵게 만들고 있다. 將次 많은 資料가 蒐集되던 本 公式를 거듭 分析하여 보다 信憑性이 높은 評價를 내리는 것이 必須的인 研究課題이다.

參 考 文 獻

1. Sorensen, T. Hansen, B.: Pile Driving Formulae, An Investigation Based on Dimensional Considerations and a Statistical Analysis, *Proc. 4th Int. Conf. S.M. & F.E.*, Vol. 2, 1957, pp. 61~65.
2. Chellis, R.D.: *Pile Foundation*, McGraw-Hill, 1961.
3. Smith, E.A.L.: Pile Driving Analysis by the Wave Equation, *Transaction Paper No. 3306*, Vol. 127, Part 1, ASCE, 1962, pp. 1145~1193.
4. Agershou, H.A.: Analysis of the Engineering News Pile Formula, *Journ. of S.M.F.D., ASCE*, 88, SM5, 1962, pp. 1~11.
- 5) Housel, W.S.: Pile Load Capacity-Estimates and Test Results, *Journ. of S.M.F.D., ASCE*, Vol. 92, SM4, 1966, pp. 1~30.
6. Olsen, R.E. & Flaate, K.S.: Pile-Driving Formulas for Friction Pile in Sands, *Journ. of S.M.F. D., ASCE*, Vol. 93, SM6, 1967, pp. 279~296.
7. Timoshenko, S.P. & Goodier, J.N.: *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 3rd ed., 1970, pp. 485~504.
8. Goble, G.G., Walker, F.K. & Rausche, F.: Pile Bearing Capacity Prediction vs. Performance, *Proc. Specialty Conf. of "Performance of Earth Supported Structures" Vol. 1, Part 2*, ASCE, 1972, pp. 1243~1258.
9. Holloway, D.M., Clough, G.W. & Vesić, A.S.:

The Mechanics of Pile-Soil Interaction in Cohesionless Soils, Duke Univ., School of Eng., *Soil Mechs. Series No. 39*, 1975.

10. Spence, J.T., Cotton, J.W., Underwood, B.J. & Duncan, C.P.: *Elementary Statistics*, 3rd ed., Prentice-Hall, 1976, pp. 44~64, pp. 88~97, pp. 140~160.
11. 尹起重: 統計學(全訂版), 法文社, 1979, pp. 42~82, pp. 127~148, pp. 335~385.
12. Poulos, H.G. & Davis, E.H.: *Pile Foundation Analysis and Design*, John-Wiley, 1980, pp. 52~70.
13. Bandhu, B.S.: Predicting Driving Stresses in Piles, *Journ. of Const. Div., ASCE*, 108, CO4, 1982, pp. 485~503.
14. 黃正奎: 말뚝의 動的 支持力 解析—새로운 公式의 誘導와 考察, 京畿大學論文集, 第13輯, 1983.
15. 大崎順彦: 杭打公式(2), 建築技術, Vol. 91, 1959.

附 錄

記號解說: 本 論文에서 使用한 記號는 다음과 같다.
 R = 말뚝의 動的 支持力 公式에서 算出된 極限支持力
 e_f = 램머의 效率

E_n = 램머의 打擊에너지

}	Drop Hammer	$E_n = W \cdot H$
	Single-acting Steam Hammer	$E_n = W \cdot H$
	Double-acting Steam Hammer	$E_n = (W + p \cdot A_c) H = (W + W_c) H$
	Differential-acting Steam Hammer	$E_n = (W + p \cdot A_c) H = (W + W_c) H$
	Diesel Hammer	$E_n = 2W \cdot H$

W = 램의 重量

H = 램의 落下높이

p = 램머의 피스톤에 作用하는 蒸氣壓(또는 空氣壓)

A_c = 램머 실린더의 有效斷面積

W_c = 램머 케이싱의 重量

W_p = 말뚝의 重量(말뚝全體, 쉘, 컷손 및 슈의 重量의 合計이며, Double acting 및 Differential-acting Steam Hammer 를 使用할 때에는 Anvil 의 重量을 加算함)

e = 램머와 말뚝이 衝擊할 때의 反撥係數

s = 램머의 最終打擊에 의한 말뚝의 打込깊이

c_1 = 컷손의 彈性變形量

c_2 = 말뚝의 彈性變形量

c_3 = 흙의 彈性變形量

A = 말뚝 本體의 平均 斷面積(公式中에서), 回歸係數 (統計值中에서)

l = 말뚝 머리에서 抵抗中心까지의 거리
 E = 말뚝材料의 彈性係數
 δ = 말뚝의 支持力을 이루는 周面摩擦力과 先端支持力의 比率에 따라 주어진 係數
 L = 말뚝의 길이
 λ = 말뚝이 地表에 露出된 길이 ($\lambda \cdot L$)의 全長(L)에 대한 比
 $c' = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot g}}$
 ρ = 말뚝材料의 密度
 g = 重力加速度
 R_s = 말뚝의 載荷試驗時에 荷重-沈下量圖에서 찾아낸

破壞荷重(降伏點의 荷重)
 R_s = 말뚝의 許容支持力
 F = 安全率
 $\varphi = \frac{R}{R_s}$
 $\bar{\varphi}, \bar{R}, \bar{R}_s$ = 各各 φ, R, R_s 의 平均値
 N = 資料의 數
 σ_φ = φ 의 標準偏差
 r = 相關係數
 B = 截片
 C = 變動係數

(接受 : 1983. 11. 7)