

7

杭の降伏荷重と極限支持力の比について

支持杭と摩擦杭の載荷試験の結果より

井 上 嘉 信

§ 1. は じ め に

日本建築学会、建築基礎構造設計規準、同解説の第29条においては、杭の長期許容支持力を載荷試験の結果より求める場合には、支持杭摩擦杭の両種の杭とも、基準の支持力を次に述べる値以下としなければならないとしている。

すなわち、載荷試験における降伏荷重以下の値の1/2、または極限支持力の1/3、および杭材料の許容圧縮応力度に28条に述べた、断面積をかけて求めた支持力のうち、いずれか小なるものとする、とある。この考え方の理論的根拠はあまり明瞭でないが、今日では、一般の載荷試験にこの考え方が広く用いられている。

杭の載荷試験、特に支持杭の場合には、極限支持力まで載荷すると、荷重が一般に、相当大きくなるので、多くの場合、降伏荷重までか、もしくは設計許容支持力の2倍程度までしか、載荷試験が行なわれていない。このような載荷試験の資料をもとに、杭の基準の支持力を求めるのに、降伏荷重の1/2、または最大荷重の1/2としている場合が多い。

上記のような方法を用いた場合に、規準の示す極限支持力に対して、安全率が3あるかという疑問が生ずる。特に降伏荷重の1/2が、杭において、常に極限支持力の1/3より小さいという関係が、理論的にも実際においてもないことを考えるとき当然といえよう。

そこで、載荷試験の結果より、支持杭と、摩擦杭における降伏荷重と極限支持力の大きさの比を、統計的に求

め、両者の関係の大略的な値を得んとするものである。

§ 2. 載荷試験結果の整理

(1) 資 料

資料としては、後述の諸文献に見られる載荷試験結果、清水建設研究所で行なわれた載荷試験の結果、および同社の現場において行なわれた結果と、北大工学部建築工学科大野研究室で行なわれた載荷試験の結果を用いた。

杭の種類は鉄筋コンクリート杭と木杭の2種類であるが、今回は杭種の区別は行なわないことにした。

(2) 支持杭と摩擦杭の判別

杭と地盤との相関性、載荷試験の荷重—沈下曲線の性状などによって、支持杭、摩擦杭の判別を行なったが、この際に、いずれとも明確に判定することの困難な杭は、中間的な杭として考える方法もあるが、これには十分な検討も必要とされるので、今回は一応資料から除外した。

上記のような経験的方法によって、支持杭、摩擦杭の判別を行なったが、このような方法は、載荷試験法も明確に統一されていないこと、土質の分類や試験法に個人差の入ることなどを考えれば、止むを得ないであろう。

荷重、沈下、時間曲線は図—1のように、杭の支持形式により一般に3種類に分けられ、Aの形のものが支持杭、Cの形のものが摩擦杭に多く見られ、Bの形のもの

は、その判定の困難な、いわゆる支持杭と摩擦杭の中間的な杭といえよう。

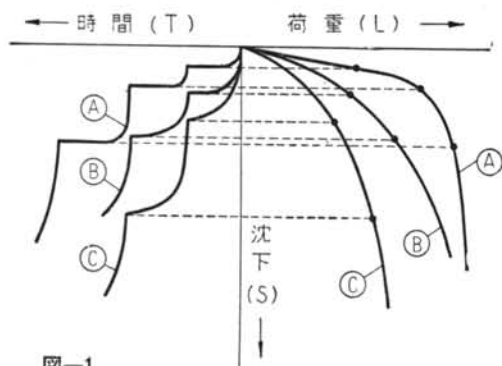


図-1

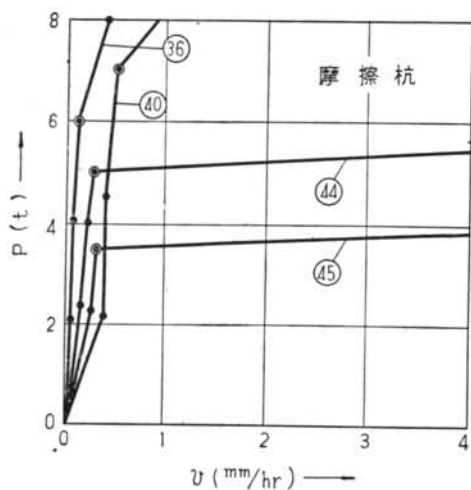


図-2

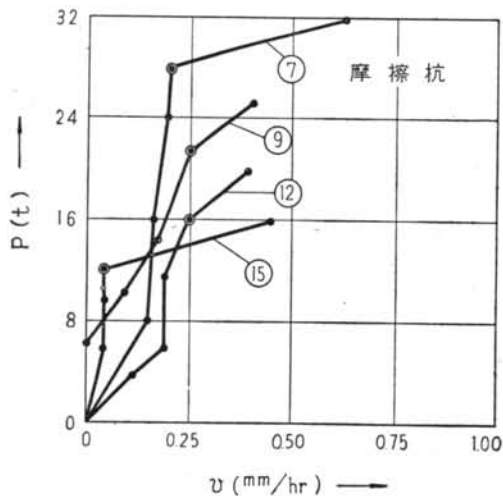


図-4

(3) 載荷試験結果の再検討

得られた資料は一応、日本建築学会、建築基礎構造設計規準、同解説（昭和27年11月および昭和36年改訂の規準）に示されている方法を用いていると考えられるが、細部においては若干の個人差が入っているのは当然といえよう。特に各試験結果の判定は、一律の基準のもとには行なわれていないので、改めて、降伏荷重と極限支持力は一律の定義に従って、一律の方法で求め直した値を用いた。

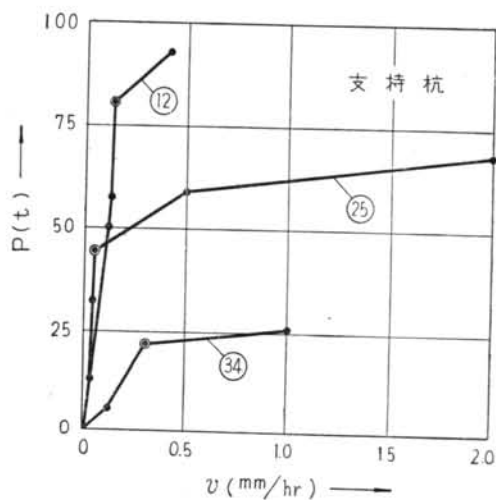


図-3

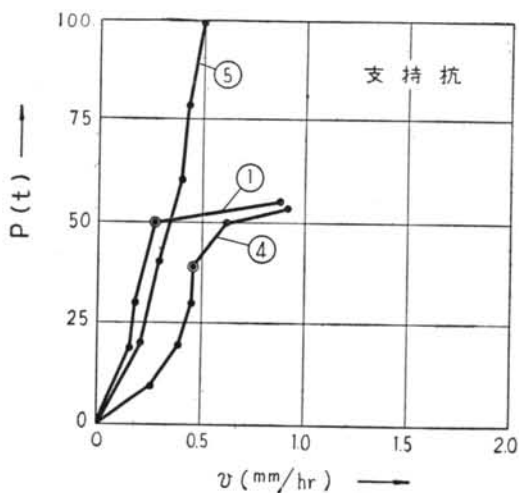


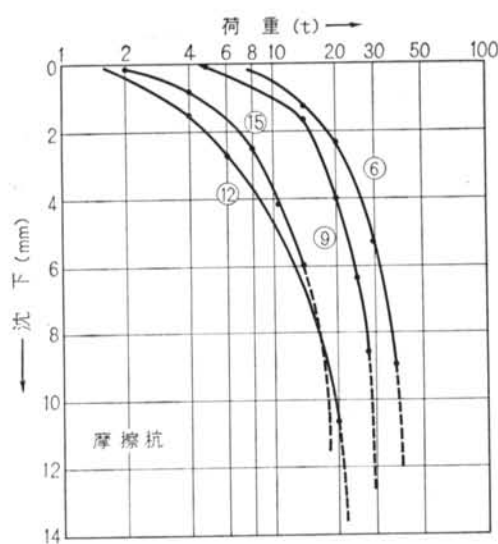
図-5

(4) 降 伏 荷 重

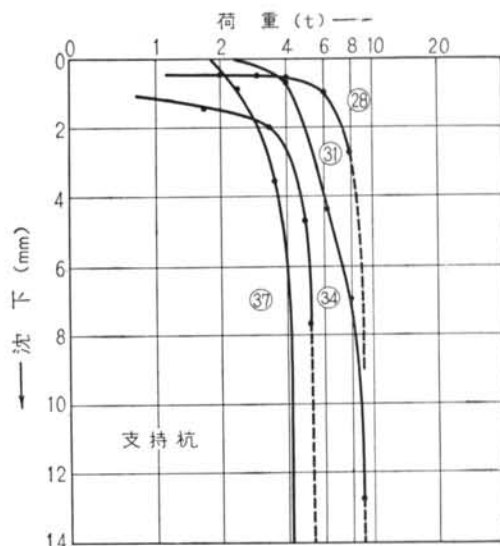
それ以上の荷重においては杭頭の沈下が、目だって大きくなる点の荷重，すなわち荷重—沈下曲線において，直線的傾きが顕著でなくなり，曲線の曲率をもっとも大きくなる点の荷重，と定義した。しかしこれでは漠然と

しているのを，実際には文献(1)の方法によって求めた。その1例を図2, 3, 4, 5に示す。

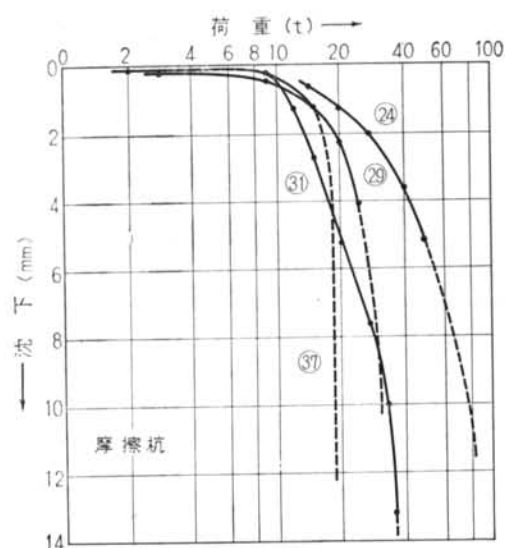
図2~5は，沈下速度の変化を各荷重段階ごとに求めて表示したもので，●を付した点は沈下速度の急に变化する点を示すもので，降伏荷重点と考えられる。なおここで示した沈下速度とは，支持杭では荷重をかけて，1



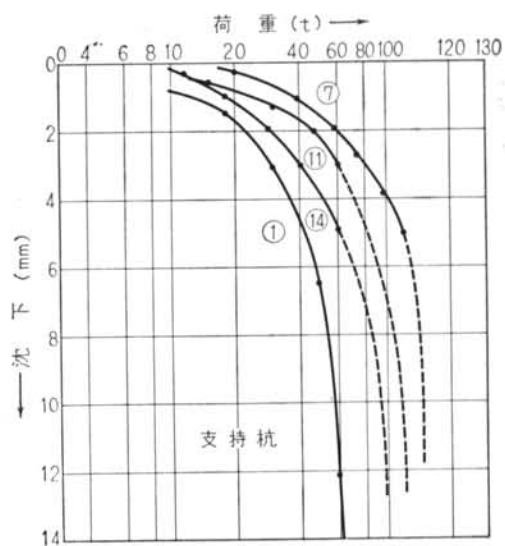
図—6



図—7



図—8



図—9

表-1 摩 擦 抗

No.	Ry(t)	Ru(t)	Ry/Ru (%)
1	9	12	75
2	3	6	50
3	18	25	72
4	15	20	75
5	8	12.5	64
6	40	40	100
7	27	30	90
8	22	25	88
9	20	25	80
10	20	25	80
11	19	20	95
12	16	20	80
13	16	19	84
14	14	19	74
15	12	18	67
16	10	17	59
17	12	16	75
18	14	15	93
19	12	15	80
20	10	13	77
21	10	14	72
22	9	14	64
23	9	14	64
24	8	12	67
25	9	13	69
26	9	13	69
27	8	12	67
28	10	12	83
29	8	12	67
30	10	12	83
31	10	12	83
32	6	11	54
33	8	11	73
34	9	11	82
35	10	11	91
36	6	9	67
37	8	10	80
38	7	10	70
39	8	9	89
40	7	9	78
41	6	8	75
42	5	5.5	91
43	6	7	86
44	5	6	83
45	3.5	4.5	78

平均 72.3

表-2 支 持 抗

No.	Ry(t)	Ru(t)	Ry/Ru (%)
1	55	75	74
2	10	15	67
3	75	95	79
4	45	60	75
5	90	120	75
6	30	40	75
7	150	160	94
8	140	150	93
9	120	145	83
10	115	145	79
11	120	130	92
12	80	100	80
13	90	100	90
14	95	100	95
15	80	95	84
16	90	100	90
17	80	100	80
18	80	95	85
19	80	95	85
20	85	90	94
21	80	90	89
22	80	90	89
23	70	85	83
24	75	80	90
25	45	65	69
26	52	65	80
27	58	60	97
28	45	50	90
29	45	50	90
30	36	40	90
31	30	34	88
32	25	30	83
33	25	30	83
34	20	30	67
35	12	15	80
36	15	18	83
37	15	18	83

平均 78.5

時間前後、摩擦杭では3～4時間前後の平均沈下速度である。各図の曲線に付した数字は表1および表2の杭番号を示している。

(5) 極限支持力

極限支持力とは載荷しうる最大荷重でなくして、ある一定荷重の継続作用(持続載荷)による、杭頭の沈下の経時的増加が終息する傾向を失わない、と認め得る載荷重の最大の値である、と定義した。上記のように極限支持力を決定するには、各荷重段階の杭の沈下量の経時的増加が重要事項なので、荷重沈下曲線と同時に、沈下時間曲線も十分検討を加えて判定した。しかしはじめにも述べたように、極限支持力を判定できる点まで載荷していない結果もあったので、これらに対しては、文献(1)の方法により極限支持力を推定した。なおこの方法の1例を図6, 7, 8, 9に示す。

これらの各図は荷重を横軸に対数目盛で、沈下を縦軸に算術目盛で荷重—沈下曲線を描いたものである。各図の曲線に付した数字は、表1および表2の杭番号を示すものであり、曲線の実線部分は測定値を示し、点線は推定値である。

§ 3. 載荷試験の結果

§2の(2), (3)に述べた方法により検討し直して求めた、降伏荷重と極限支持力の大きさと、両者の比を、摩擦杭と支持杭に分けて、それぞれ表1, 表2に示す。

§ 4. 考 察

表1, 表2の各数値は、全資料を

§1 に述べた一定の基準、方法により、再検討して得られた結果ではあるが、基準自身もかなり漠然としているし、その方法もまた確実なものとはいえないので、すべての杭に対して、十分満足できる数値が得られたとは考えられないが、しかし摩擦杭、支持杭の両種の杭共に、その大略の数値は得ることが出来たといえよう。

摩擦杭、支持杭の降伏荷重 R_y と極限支持力 R_u の比についてみると、摩擦杭の場合 R_y/R_u の百分率は、最高100%で、最低50%、全平均値が72.3%である。支持杭の場合には R_y/R_u の百分率が、最高97%で、最低67%、全平均値が78.5%となっている。この結果よりすれば、 R_y/R_u の百分率については若干摩擦杭の場合より支持杭の場合の方が大きい値を示している。

最高最低値については、摩擦杭の100%~50%に対して、支持杭の97%~67%と、その範囲が摩擦杭に比較して支持杭の方が若干狭くなっている。

以上の結果よりして、 R_y/R_u の比が摩擦杭より支持杭の方が大きい値を示していることは、特に支持杭の載荷試験において、最大載荷重の大きさに十分注意する必要があるといえる。以下このことに関して若干考察を行なってみる。

§1 も述べたように、規準の第29条に従って、載荷試験により長期許容支持力を決定する基準支持力 R_a を求めるとすれば、 R_a は

$$yRa \leq 1/2R_y \text{ もしくは } uRa \leq 1/3R_u$$

で、 yRa 、 uRa のうちいずれか小なるものとなる。ここで常に $R_y \leq R_u$ であるから、この規準（降伏荷重に対して2、極限支持力に対して3の安全率を確保するとすれば）によるとすれば、最大に取りうる基準支持力 R_a は $yRa = uRa$ の時である。この場合 $1/2R_y = 1/3R_u$ で

$$R_y/R_u = 2/3 = 0.67$$

となる。したがって上記の安全率を確保して、最大の基準支持力を得るには、この R_a を $R_y/R_u \leq 0.67$ の範囲に求めなければならない。

しかし、前述の実際に行なわれた載荷試験の結果の統計値によれば、摩擦杭で $R_y/R_u = 0.72$ 、支持杭で $R_y/R_u = 0.78$ で、いずれの場合にも0.67より大きい。このことは載荷試験において降伏荷重程度までしか載荷しないで、基準支持力を $R_a = 1/2R_y$ として求めた場合には、極限支持力に対して、摩擦杭では2.8、支持杭では2.6の安全率となり、規準に示す3の安全率は確保されないことになり、極限支持力に対して、基準支持力を危険側に求めたことになる。ただしここで規準の示す安全率の値そのものが問題となるが、一応規準にしたがう場合を考

えることとする。

以上のことより、降伏荷重程度までしか載荷せず、降伏荷重より基準支持力を求める場合には（ $R_a = yRa = 1/2R_y$ とする）、 $R_y/R_u \leq 0.67$ を確認しない限り、常に極限支持力に対しても3の安全率が十分に確保されているとは言えない。今日 R_u の値を正確に知るには、載荷試験を行なう以外に方法はない。したがって載荷試験においては、必ず極限支持力まで載荷して、基準支持力を決定すべきであろう。

この統計による結果が十分満足でき、信頼できるものといえれば、非常に漠然として、決定しがたい降伏荷重も、極限支持力を知れば逆に R_y/R_u の値より、大略の数値をかなり容易に推定することが可能になると考えられる。また推定可能でないにしても、推定の大きな目安になることは十分考えられる。極限支持力は載荷装置の施工の難易を別とすれば、その値は載荷試験によれば、比較的容易に判定できて明瞭でもあるので、上記の推定は可能であろう。

§5. む す び

1. 降伏荷重 R_y と極限支持力 R_u の比 R_y/R_u は摩擦杭では0.72、支持杭では、0.78であった。
2. R_y/R_u の最高、最低値の範囲は、摩擦杭では100%~50%、支持杭では97%~67%であった。
3. $R_y/R_u \leq 0.67$ の範囲で規準にしたがい、載荷試験の結果より、基準支持力を求めれば、降伏荷重に対して2、極限支持力に対して3の安全率が確保されるが、本論の結果よりすれば、降伏荷重の1/2で基準支持力を求めた場合には、極限支持力に対して、摩擦杭で2.8、支持杭で2.6の安全率となり、3の安全率は確保されないことになる。
4. 降伏荷重の1/2のみで基準の支持力を決定する場合、もしくは載荷時の最大荷重 R_m （この最大荷重は降伏荷重以下とする）の1/2で基準支持力を決定する場合には、 R_y/R_u 、 R_m/R_u の値に十分注意して、極限支持力に対して、予定していた（少なくとも3以上の）安全率が確保されているか否かを、必ず確認する必要がある。

5. 前記のためにも、また R_y/R_u の平均値よりみても、杭の載荷試験、特に支持杭の場合には必ず極限支持力を確認するまで載荷して、基準支持力を求める必要がある。
6. 極限支持力は載荷時の杭の性状または、荷重—沈下曲線等によれば、比較的容易に判定できるので、 R_y/R_u の信頼できる値が、摩擦杭、支持杭に対して得られれば、漠然として判定しがたい降伏荷重の大略的数値を推定する場合の一つの目安とすることができよう。
7. 最後に、資料の数が少なかったことと、再検討にはなお若干の考慮が必要で、十分満足できる結果が得られたとはいいがたいが、その大略的数値としては、十分満足できるものであるといえよう。さらに今後は、信頼できる多数の資料と、降伏荷重の判定が十分に行ないうれば、 R_y/R_u の満足できる数値が得られるもの

と思う。

8. 今回は沈下量のことに関してはふれなかったが、降伏荷重、極限支持力に対する沈下量の関係も重要なことで、検討を加える必要があろう。

＜参考文献＞

- (1) 川崎浩司、荻野郁太郎；荷重・沈下・時間曲線の性状による杭支持力推定法、日本建築学会論文報告集 第60号
- (2) 池田俊雄、室町忠彦；地耐力調査法、鉄道現業社、昭和35年4月
- (3) 日本建築学会；建築基礎構造設計規準、同解説、昭和27年版、昭和36年版
- (4) Chellis；Pile Foundation, McGraw-Hill, (1961)
- (5) 北海道大学工学部建築工学科大野研究室；杭耐力試験報告書
- (6) 清水建設研究所；杭耐力試験報告書