

パイルドラフトの効果と応用

(建築学科) 西村光正
 (建築学科) 門前勝明
 (福山大学) 芳賀保夫

Effect and Application of the Piled-raft.

(Department of Architecture) Mitsumasa NISHIMURA
 (Department of Architecture) Katsuaki MONZEN
 (Fukuyama University) Yasuo HAGA

Abstract

Piled-raft is the method which began to notice for the purpose of reducing settlement and differential settlement recently, though it is known since a past. In this report, comparison examination between raft and friction pile was carried out by the convenient calculation, and the effect and application were examined.

In addition, future utilization is expected the piled-raft, because the effect of reinforcement of the weak stratum near ground surface and strengthening of the horizontal resistance force can be also expected.

Key Words : piled-raft、friction pile、raft、settlement

パイルドラフト、摩擦杭、べた基礎、沈下

1. まえがき

パイルドラフトとはラフト（べた基礎）に摩擦杭を併用して沈下・不同沈下を軽減させることを目的とした工法である。対象となる地盤は主に粘性土層である。

現行の建築法令では異種基礎の併用は原則として認められないため、許容支持力は直接基礎として検討し、併用する摩擦杭は沈下・不同沈下を減らすためだけに用いる。

ヨーロッパの文献にはかなり早くからこの工法が発表されている。過圧密粘土層に用いられた場所打杭など我々の目からは支持杭に見えるような例もある。

我が国において、この工法が使用されたのはごく最近のことで、地盤工学会誌「土と基礎」解説に掲載されたのも1999年12月からである^{1)~3)}。また建築学会建築基礎構造設計指針2001⁴⁾にも始めてこの工法の項が設けられた。

建築学会大会に発表された梗概の件数は、1999年から2003年までの過去5年間で、5、5、3、6、11件とまだ少数である。

支持杭が多用されている我国においてこの工法が普及するかどうかはまだ未知の状態である。また在来の摩擦杭基礎のニーズも根強いものがある。

2. パイルドラフトのメカニズム

これまで用いられてきた摩擦杭基礎とパイルドラフトの相違は表1のようになる。

杭周面摩擦力の大きさと地盤とのズレの関係は図1のように模式化できる。

摩擦杭基礎では建物荷重はすべて杭で支持される。杭頭荷重の大きさは極限支持力 R_u の $1/3$ 以下におさえられているため杭頭沈下量も杭周面と地盤のズレも小さい。このため周面摩擦力は地盤とのズレの大きさに比例し、杭頭で0、杭先端で最大の三角形分布になると考えられる。

パイルドラフトの杭は沈下量も大きく、杭周面と地

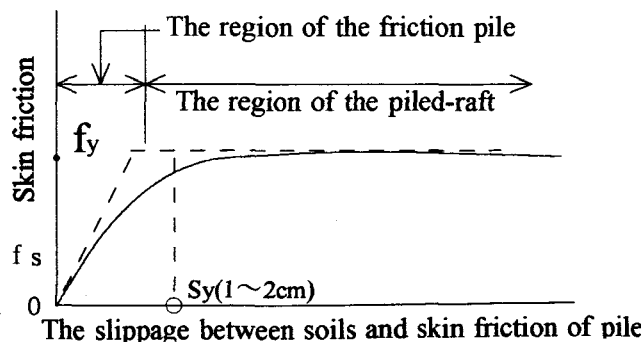


Fig.1 The size of skin friction of pile

Table 1 The difference of the property between friction pile and piled-raft

Method	Support means of the load	The load of the pile top	The settlement of the pile top	Depth direction distribution of the skin friction of the pile
Friction pile	Bearing capacity of pile	$R_u/3$	Small	Triangle distribution $f_s \propto s \quad s \leq s_y$
Piled raft	Bearing capacity of soils	$\approx R_u$	Large	Linear distribution $f_s \propto s \quad s > s_y$

As; The periphery surface area of the pile. fs; The surface friction of the pile.
 fy; The surface friction of the pile in yield time. Sy; S as the surface friction of the pile yields.
 S; The size of the slippage between pile periphery plane and soils.

盤とのズレも大きいので、周面摩擦力は降伏状態ではほぼ一定値となるので、その分布は直線状になると考えられる（杭頭付近のズレ量の少ない部分は三角形分布になるがその影響はわずかである）。

均一な地盤上の十分に幅の大きな建物を想定し、二次元問題と扱えるときのラフト（ベタ基礎）、摩擦杭、パイルドラフトの杭周面摩擦力および杭間土の鉛直増加圧力の深さ方向の分布をまとめると図2のようにな

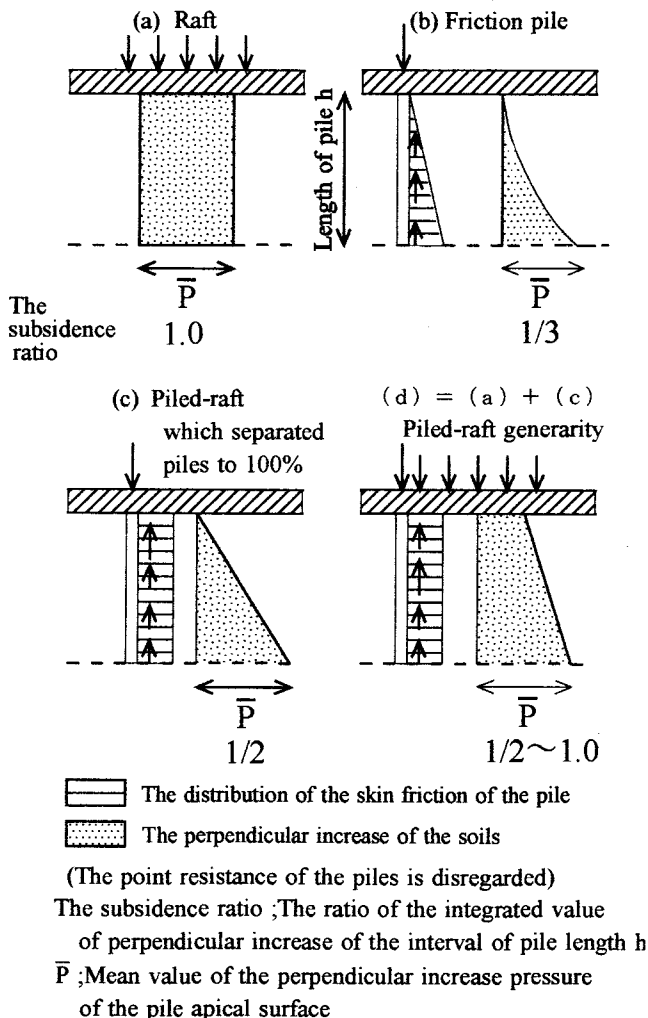


Fig.2 The size of skin friction and the perpendicular increase of the soils.

る。杭は剛体とし、群杭として用いられているものとする。杭先端抵抗は無視している。

建物荷重が同じであればどの基礎工法によっても杭先端面の鉛直増加圧力の平均値 \bar{p} は一定となる。

杭長 h 区間の鉛直増加圧力の合計が杭間土の圧縮変形に比例する。ラフトと比較して杭があるため杭間土の圧縮量が低減される割合を沈下比として図2に記入する。

杭先端抵抗があると杭間土の鉛直圧が減り、沈下比も減少するが、その割合はわずかである。この場合も杭先端下の地盤の鉛直増加圧力は \bar{p} で不変である。

図2から見てパイルドラフトはラフト底面の荷重を杭の摩擦力を介して杭先端下の地層に伝え、杭間土の圧縮変形量を減らす工法であると云えよう。

これまで摩擦杭基礎の建物の沈下計算の際に、仮想基礎底面を杭先端から杭長の 1/3 だけ上の高さに設定してきたのもこの原理によるものである。

図2 (b) (c) のモデルを満足するためには図3の条件が必要であるが、実際にもこれに近いものになっていると思われる。

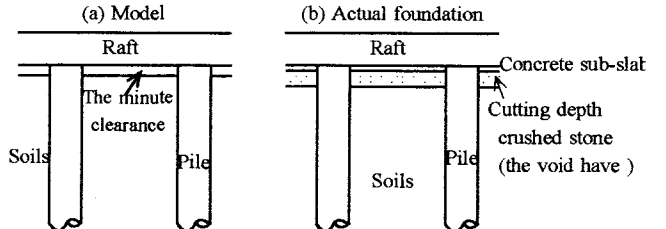


Fig.3 Model and practice of the pile top.

3. 実際の設計への応用

実際の地盤は深さ方向に均一ではなく、荷重面も二次元問題として扱わなければならない規模の例が多い。

この場合には正攻法の計算は文献2)に見られるようになりかなり複雑であり、必ずしも精度が高いものとは云えない。

しかし、次のように簡略化すると図2の応用として沈

下の軽減量を求めることができる。

- ・積層地盤では杭間土の土性は平均値を用いる。
- ・荷重面が小さいときには荷重面の位置を基礎底面より下げ、直接基礎として沈下量を計算する。
- ・圧密沈下の進行にともない、杭間土のせん断強度が増加する場合には、杭周面摩擦力 f_y の増加を考慮する。この場合に沈下の進行と共に杭の荷重分担比は増加する。

計算例

図4に示す平面の大きさ10m×20mの建物のラフトの下に一樣な性質の厚さ20mの正規圧密粘土層を想定する。粘土層の体積圧縮係数 m_v は一定値とし、建物はフレキシブルなものとする。杭長は粘土層厚の1/2の10mとする。

これ以上長い杭とするなら支持杭の方が経済的にな

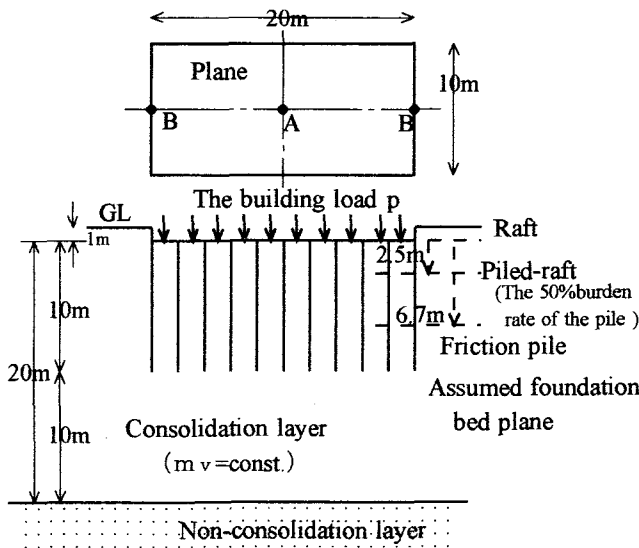
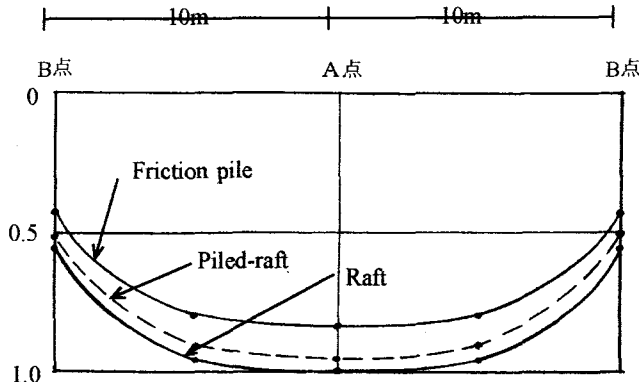


Fig.4 The calculation example

るからである。

パイルドラフト（杭荷重分担率50%）、摩擦杭基礎の2例について沈下量を計算してラフトと比較する。図2からパイルドラフトは沈下比3/4、摩擦杭



(The maximum value of raft is made to be 1.0)

Fig.5 The settlement of the each point.

基礎は1/3として仮想基礎底面を求める。あとは通常の圧密沈下量の計算と同様な手順で各点の沈下量（圧密完了時の値）をもとめ、結果を図5に示す。

平面が大きく二次元問題として扱える場合と計算例の沈下量を比較すると表2のようになる。

Table 2 The comparison of the settlement of each method.

The plain form	Raft	Piled-raft	Friction pile
Large (2 dimensions)	1	0.87	0.67
Example (3 dimensions)	1	0.96	0.84

計算例ではパイルドラフトの沈下抑制効果は大きな平面の場合に比較してごくわずかである。この原因は杭が建物荷重を分散させずに深部に押し下げることによるものである。各工法による鉛直増加圧力の分布状態を図6に示す。

The perpendicular increase stress

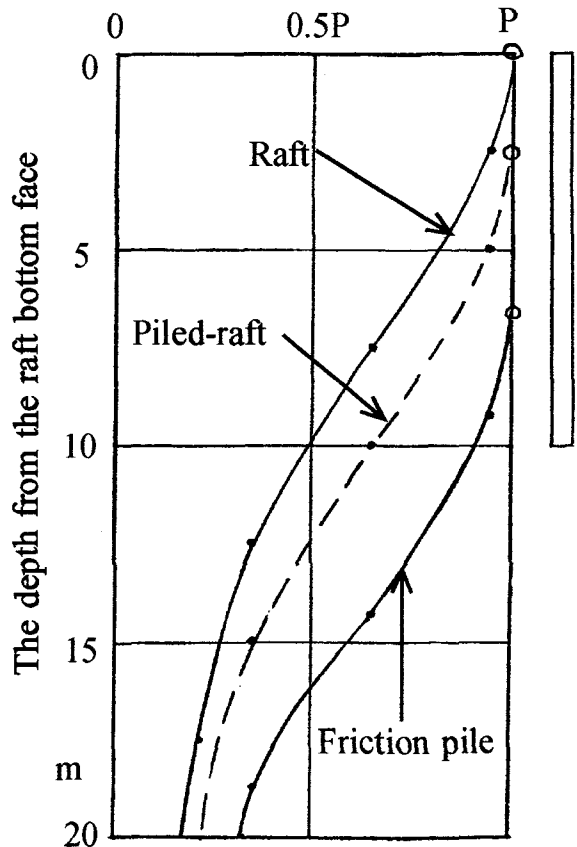


Fig.6 The distribution of the perpendicular increase pressure by each method

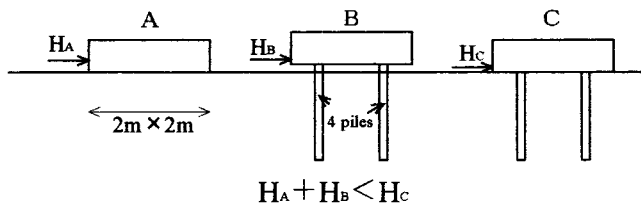
表2は均一な地層の計算例であるが、杭先端下に変形量の大きい地層があるとパイルドラフトが沈下量を

増加させる可能性もある。

4. 水平抵抗力

パイルドラフトは直接基礎として支持力の検討が行われているので、水平抵抗力もラフト底面と土との摩擦により受け持たれるのが原則である。しかし、杭にも相応の抵抗力が期待できる。小林・渡辺他^{6), 7)}の2×2本杭の実験(図7)によると、パイルドラフトの水平抵抗力は「基礎底面+杭」の水平抵抗力より大きい。

群杭の場合にもこれよりは効果は低下するものの杭の水平抵抗力が期待できると考えられる。



The steel pipe pile $\phi=48.6\text{mm}$ $t=2.4\text{mm}$ $L=3.0\text{m}$

Fig.7 Horizontal loading test of piled-raft foundation⁷⁾.

5. パイルドラフトの応用

ラフトの下に不完全支持杭(先端地盤の強度が $N < 50$ の砂レキに達している支持杭など)を群杭として用いると、ラフト底面下の地盤も建物荷重の一部を受け持つことがある。これも広い意味でのパイルドラフトと云えよう。

この場合に杭と杭間土は鉄筋コンクリート柱(RC柱)と同様にハイブリッド柱として働くことになる(図8)。

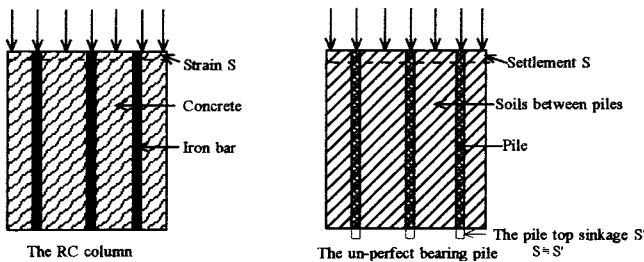


Fig.8 The difference of the hybrid structure.

RC柱では鉄筋とコンクリートの圧縮ひずみは各部で等しいので、鉄筋とコンクリートはヤング係数の比に応じて荷重を分担する。杭基礎であっても先端のめり込みがなければRC柱と同じことになるが、柱のヤング係数は杭間土よりもはるかに大きいので杭間土の荷重分担比は微量となる。しかし、不完全支持杭のように先端が支持層にめり込むと柱の見かけのヤング係数が低下し、杭間土も幾分かの荷重を分担することになる。杭自体の圧縮量は微量であるので、ラフトの沈

下量は先端のめり込み量に等しいと考えてよい。

例題として文献8)の測定建物について計算する(図9)。

測定建物

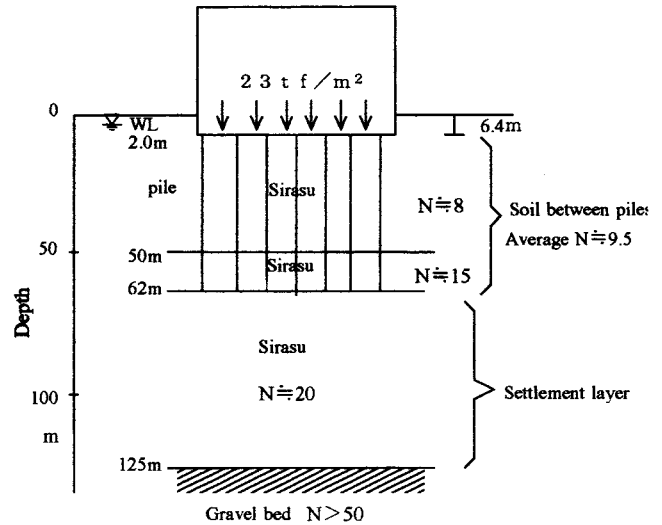


Fig.9 Measurement building of literature⁸⁾

地下SRC1階、地上S造18階、場所打杭径1.2m、平面形は6.5m×7.2mであるが一辺6.8mの正方形と見なす。

建物重量は23 tf/m²であるが、根入れ深さを考えた有効重量pを求める。

$$\begin{aligned} \text{有効重量 } p &= 23 \text{ tf/m}^2 - 1.8 \text{ tf/m}^2 \times 6.4 \text{ m} \\ &= 11.5 \text{ tf/m}^2 \end{aligned}$$

ただし、土の単位重量1.8 tf/m³、根入れ深さ6.4m、GL-5.0mまで沖積層、それ以深は洪積層

杭先端下の地層の沈下量

深さ125m以下の $N > 50$ の砂レキ層の沈下量は無視できるものとして、GL-6.2m~125m間のシラスの沈下量を計算する。沈下層を有限深さ $H = 6.3\text{m}$ 、正方形荷重面の辺長 $\sqrt{A} = 6.8\text{m}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ として文献5)の(表4.33)より、 $H/\sqrt{A} \approx 1.0$ 、沈下係数 $\mu_H = 0.379$ を得る。

文献5)の4.3.26式より、シラスの固結性を考え、 N 値とヤング係数 E との関係を $E = 28N \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ とし、 $N \approx 20$ より $E = 560 \text{ kgf/cm}^2$ を得る。

根入れ深さを無視した沈下量 S は、

$$S = \mu_H \frac{p \sqrt{A}}{E} = 0.379 \times \frac{1.15 \text{ kgf/cm}^2 \times 680 \text{ cm}}{560 \text{ kgf/cm}^2} = 5.3 \text{ cm}$$

建物幅に近い根入れ深さがあるので沈下量はほぼ半減されると考えられるので、実際の沈下量は $S' \approx 2.7 \text{ cm}$ 程度となる。

杭間土の圧縮量の計算

杭間土が建物の有効荷重の10%を分担するものと想定して計算する。

杭間土の平均N値は $N = 9.5$ 、シラスの固結性を考え、 $E_{(s)} = 28N = 266 \text{ kgf/cm}^2$

杭間土の分担荷重 $P_{(s)} = 11.5 \times 0.1 = 1.15$

tf/m^2 、土柱の高さ $H_{(s)} = 55.6 \text{ m}$ 、

土柱の圧縮量

$$S_{(s)} = \frac{P_{(s)} \times H_{(s)}}{E_{(s)}} = \frac{0.115 \text{ kgf/cm}^2 \times 5560 \text{ cm}}{266 \text{ kgf/cm}^2} = 2.4 \text{ cm}$$

杭先端沈下量が杭径の10%に達したときの荷重を極限支持力とすると、その1/3の設計支持力時の沈下量はほぼ杭径の2%程度となる。杭径 $d = 120 \text{ cm}$ 、杭間土が荷重の10%を受け持つため、杭先端の荷重は90%に低下すると考えると、杭先端のめり込み量 $S_{(p)} = 0.02 \times d \times 0.9 = 2.2 \text{ cm} \approx S_{(s)}$

杭間土は建物荷重の10%程度を分担しているものと推定される。

建物の沈下量

建物の総沈下量 ΣS は、杭先端下の沈下量 S と杭先端のめり込み量 $S_{(p)}$ の合計と考えると、

$$\Sigma S = S + S_{(p)} \approx 2.7 \text{ cm} + 2.2 \text{ cm} \approx 4.9 \text{ cm}$$

建物中心部での沈下量の測定値は $\approx 5.0 \text{ cm}$ (完成時)とのことである。解析による杭間土の荷重分担率は17%となっているが、ハイブリッド土柱の周面摩擦で荷重が周辺の地盤へ分散される効果によるものであろう。

杭の軸力

ハイブリッド土柱では杭軸力は深さ方向に一定になるが、測定結果(図10)では外周の杭のGL-50~62m間に土柱周面摩擦で軸力が低下する様子が見られる。

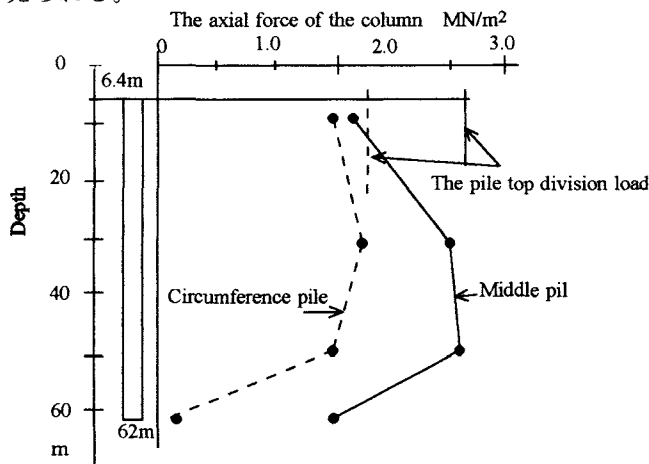


Fig.10 Pile axial force distribution of the example building⁸⁾.

6. まとめ

パイルドラフトには地表面付近の軟弱層の補強、水

平抵抗力の強化など沈下・不同沈下の抑制以外の効果も期待できる。

沈下量等の検討は荷重面を適切に仮定することにより直接基礎(べた基礎)と同様、簡便な方法で検討することができる。これは群杭基礎の場合も同様である。

採用にあたっては在来工法である摩擦杭基礎、支持杭などとのコスト面での比較検討が必要となろう。

本報文がパイルドラフト基礎の検討資料として参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 山下清、堀越研一：杭基礎の鉛直荷重～変異特性の評価方法入門 4. 解析による群杭およびパイルドラフトの荷重～変位特性の評価方法(その1)、土と基礎、Vol. 47-12、No. 503、1999. 12、pp. 55~60
- 2) 堀越研一他：同上(その2)、土と基礎、Vol. 48-1、No. 504、2000. 1、pp. 51~56
- 3) 堀越研一他：同上(その3)、土と基礎、Vol. 48-2、No. 505、2000. 2、pp. 47~52
- 4) 日本建築学会；基礎構造設計指針、第7章 併用基礎、7.3パイルド・ラフト基礎、pp. 339~347、2001
- 5) 日本建築学会；基礎構造設計指針、第4章 基礎の設計方針、(1) 一様な水平地盤上の基礎の即時沈下量、pp. 147~149、1988
- 6) 小林治男、渡辺徹他；パイルドラフト基礎の原位置水平載荷試験、その1. 実験概要および地盤概要、日本建築学会大会(東北)、2000. 9、pp. 613~614
- 7) 小林治男、渡辺徹他；パイルドラフト基礎の原位置水平載荷試験、その2. 実験結果、日本建築学会大会(東北)、2000. 9、pp. 615~616
- 8) 佐原守他；荷重伝達法に基づくパイルド・ラフト基礎の即時沈下に関する一解析法、日本建築学会構造系論文集 第561号 pp.111~118、2002年11月