

薄層地盤における模型杭の施工時および載荷時の地中応力

正会員 ○石川隆太*1 正会員 土屋 勉*2
正会員 島田正夫*3 正会員 佐藤 光*4
会員外 齋藤崇人*5

2. 構造—4. 基礎構造—e. 杭（鉛直）
回転貫入杭，模型実験，薄層，土圧

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎はある程度の沈下を許容することから，通常の支持層よりも浅い位置にある砂層（以下，薄層と呼ぶ）に杭支持できる可能性が考えられる．そこで，薄層を再現した比較的大型の加圧土槽において，これまでに施工法の異なる3種の杭工法の挙動に関する模型実験^{1),2)}を行った．その結果，杭施工法の違いにより，施工時に特徴的な杭体応力が発生すると共に，載荷時の挙動が大きく異なることが明らかになった．杭施工法によって杭周地盤の応力状態が変化すこ

とは容易に想像できるが，これを実験的に確認した例³⁾は少ないのが現状であり，薄層を対象とした研究は皆無と思われる．

そこで本報告では，薄層を有する地盤における種々の杭の支持力特性を明確にする一環として，新たに土槽中に土圧計を埋設して，施工時および載荷時における杭周囲の地中応力測定を試みた．

2. 実験方法

2. 1 実験装置と土圧計設置

実験装置を図1に示す．模型地盤は東北硅砂6号を用いるが，一般地盤と薄層地盤を作製するために，サンドレーナーに取り付けたノズルの口径

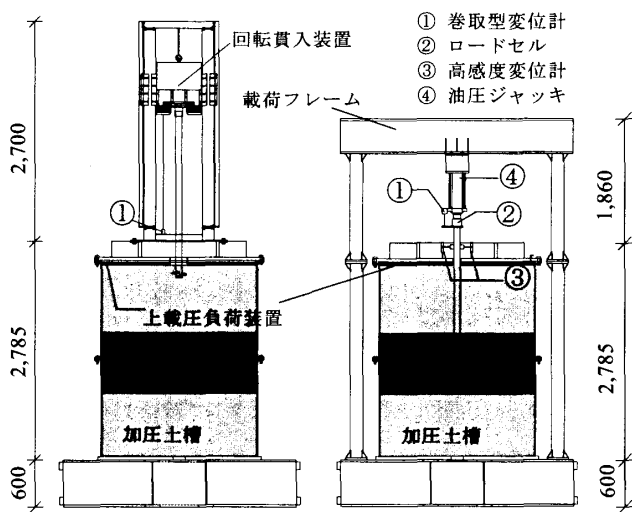


図1 実験装置

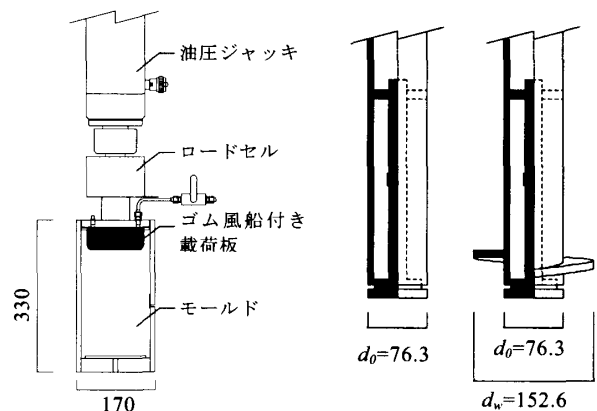


図3 較正試験装置

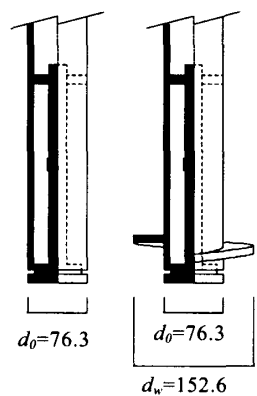
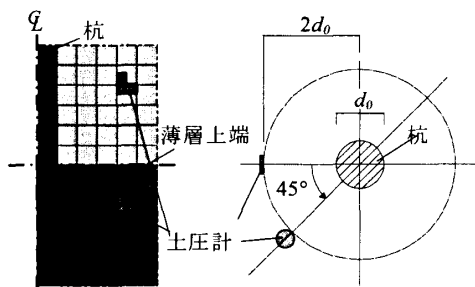


図4 模型杭



※1升 = 0.5d₀
<断面図> <平面図>
図2 土圧計設置

表1 実験条件一覧

杭施工法	回転貫入(W)				圧入(J)
	LD2L	LD4L	LD8L	LD	LD4L
モデル名	LD2L	LD4L	LD8L	LD	LD4L
地盤条件	薄層			二層	薄層
上載圧 σ_v' (kPa)	100				
相対密度	薄層 98【37】				
D_r (%)	一般地盤 44【7】				
薄層厚 ($\times d_0$)	2	4	8	20	4
地盤構成	[Diagram showing soil layer composition]				

を変化させ、ネットを介して空中落下させた。土圧計設置深度に達すると、図2に示す位置（杭中心から $2d_0$ 外側、薄層上端から上部へ $2d_0$ と下部へ $1d_0$ ）に土圧計（共和電業製 BEC-A, BED-A）を設置した。鉛直土圧計および水平土圧計の受圧面は、それぞれ上方向および土槽中心方向とした。

なお、図3に示す装置のモールド内に土圧計埋設位置の地盤状態を再現し、土圧計の較正実験を実施しており、それらの較正值を使用した。

2. 2 模型杭と実験条件

模型杭は、圧入杭（軸径： $d_0=76.3$ ）と回転貫入杭（軸径： $d_0=76.3$ ，羽根径： $d_w=152.6$ ）である。図4に示すように、杭先端部を二重管構造とすることで、ひずみゲージにより先端面と羽根面の応力をそれぞれ分離して測定した。

表1は実験条件の一覧であって、モデル名は表層からの地盤構成を表わす。すなわち、Lは一般地盤（相対密度44%）、Dは薄層地盤（相対密度98%）であって、数値は杭軸径に対する薄層厚の比を示している。

2. 3 実験手順

回転貫入杭(W)の施工実験は、地盤作製後、上載圧を负荷させた状態で所定の深度まで回転貫入させ、引き続き上載圧を維持したままで残留応力の推移を測定する。圧入杭(J)の施工実験は、地盤作製後、上載圧を负荷させた状態で所定の深度まで断続的に連続荷重を行う。

施工実験終了後における各杭の載荷実験では、上載圧を负荷させた状態で、杭頭への段階荷重を実施する。

3. 薄層地盤における杭先端面荷重と土圧

図5は回転貫入杭、圧入杭のLD4Lモデルにおける杭先端面荷重および薄層内の土圧について、施工開始から荷重終了までの一連の過程の測定値を杭先端位置との関係でそれぞれ表わしたものである。図中の0は薄層上端位置、破線は土圧計の設置深度である。これらの計測結果について、以下のような時点に区分して考察を行う。

3. 1 施工開始時

施工開始時点の鉛直土圧は概ね100kPaでバルーンに与えた上載圧に一致している。また、水平土圧は鉛直土圧の40~50%であり、jakyの式に一面せん断試験により求めた内部摩擦角（ $\phi=36\sim 41^\circ$ ）を代入し求めた静止土圧係数 $K_0=1-\sin\phi=0.37\sim 0.46$ に概ね近似していた。

3. 2 施工中

(1) 圧入杭

杭先端面荷重の推移をみると、施工開始から僅かずつ増加していたが、薄層上端300mm位置付近から急増して、杭先端が薄層上端に達した時点で約15MPaで最大となる。

この間の土圧計に着目すると、施工を開始するとしばらくは土圧計の値に変化は見られない。しかし、鉛直土圧は杭先端が薄層上端から500mm程度になると上昇して、薄層上端100mm時点でピークに達する。その後は急減して施工終了時点では、施工開始時点よりも僅かに大きい程度である。水平土圧は、杭先端面荷重が上昇した薄層上端300mm程度で急増して、杭先端が薄層に達した時点では1,000kPa以上にもなる。

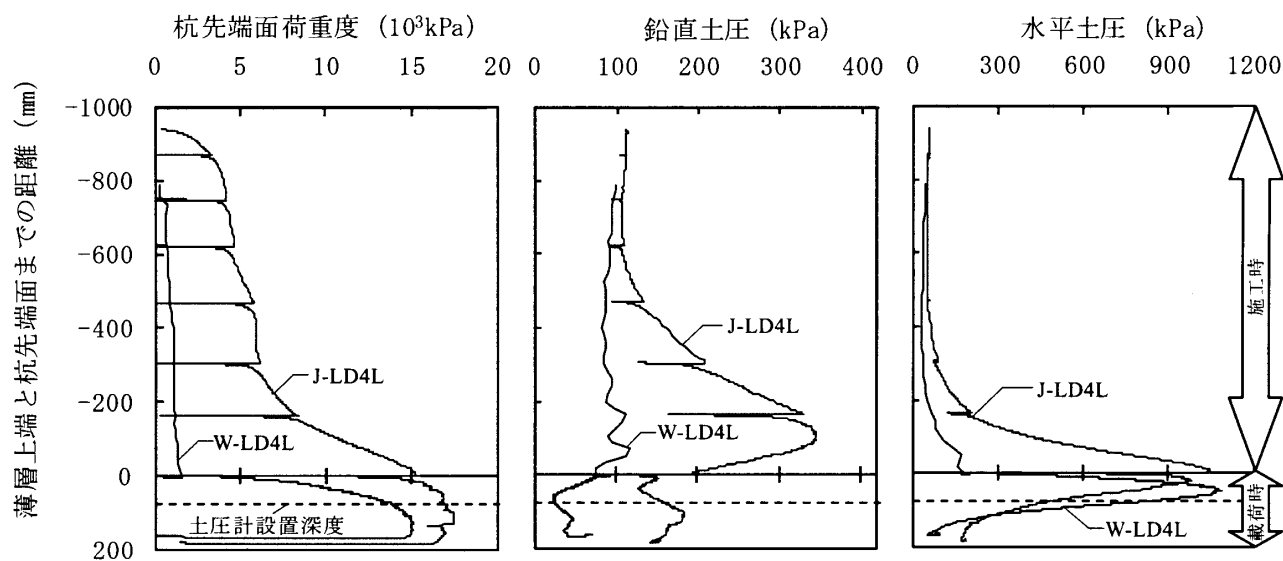


図5 杭先端面荷重および土圧の推移（全過程）

(2) 回転貫入杭

回転貫入中の杭先端面荷重はほぼ一定であり、圧入杭のその10~20%程度にすぎない。回転貫入中の水平土圧は杭先端が薄層上端に近づくと僅かに増加するが、鉛直土圧はほとんど一定値で推移している。

以上のことから、回転貫入杭は軸径部分の体積に相当する地盤を排除するものの、施工に伴う周辺地盤への影響が限定的であることが示唆される。

3.3 施工終了後

施工終了から測定値の変化が小さくなった時点(回転貫入杭で2hour, 圧入杭で15min経過程度)の残留応力を、図6に示す。図中には、施工中の最大応力も示したが、以下のことが云える。

(1) 圧入杭

杭先端面荷重については、施工終了時点の最大値で約15MPaであったものが、施工終了により杭頭荷重を除荷すると、約1MPa程度まで減少してほとんど残留していない。

一方、鉛直土圧および水平土圧については、施工時最大応力の30~40%が残留している。

(2) 回転貫入杭

杭先端面荷重は施工終了時点より僅かに減少するが、残留応力は圧入杭と同程度となった。

鉛直土圧および水平土圧については、施工時最大応力よりも僅かに小さいだけであり、大部分が残留している。それにもかかわらず、水平土圧の残留値は圧入杭の半分以下である。

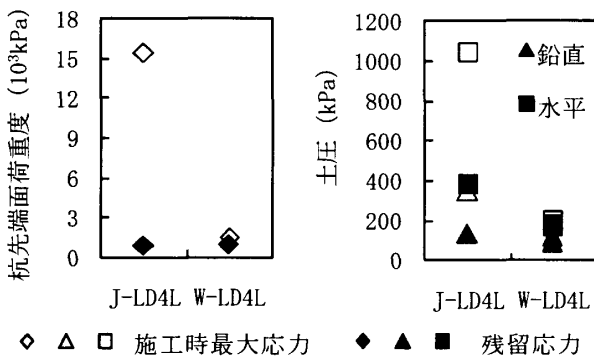


図6 施工時最大応力と残留応力

3.4 鉛直荷重時

(1) 圧入杭

杭先端面荷重は荷重に伴って急増して $1.5d_0$ 沈下時点で最大になる。それ以上の沈下では、杭先端面荷重が減少する傾向となり、薄層厚 $4d_0$ 以深にある一般地盤の影響を受けていることが示唆された。

荷重中の鉛直土圧には大きな変化がないが、水平土圧は荷重直後に急増した後に急減した。

(2) 回転貫入杭

荷重時の杭先端面荷重は、荷重に伴って大きく増大を続け、3.2で述べた施工中とは大きく異なる。荷重の進展に伴い杭先端面荷重が増大して、圧入杭に近づく傾向を示す。

荷重中の鉛直土圧は減少した後ほぼ一定となった。水平土圧は荷重後に急増した後に急減したが、最大値の発生深度は圧入杭のそれよりも明らかに深くなっている。回転貫入杭と圧入杭におけるこれらの差異は、杭先端部コア(杭先端近傍の地盤が強く圧縮された高密度領域)の形成される時期の影響と考えている。すなわち、圧入杭では施工中にコアが形成されるが、回転貫入杭では施工中は羽根による拘束圧低減作用によってコアが形成されない。回転貫入杭では、羽根面下の緩み領域が解消された荷重段階で、コアが形成されるものと推察している。

(3) 地中応力の弾性解との比較

上記の土圧挙動を考察するために、杭先端面に作用した荷重による地中応力伝播について、Mindlin解との比較を試みる。

図7は、荷重に伴う杭先端位置と土圧計位置を考慮しながら、杭先端面で実測された荷重による土圧計位置の垂直応力をプロットしたものである。圧入杭の鉛直土圧は実験値と概ね一致する。しかし、回転貫入杭の実験値は荷重の進展に伴って減少して鉛直土圧が Mindlin 解よりも小さくなる。一方、水平土圧の実験値は圧入杭および回転貫入杭共に、Mindlin 解よりもはるかに大きくなる。特に、回転貫入杭においては荷重開始に伴い急増しており、回転貫入杭に取付けられた羽根の影響が顕著であることが分かる。

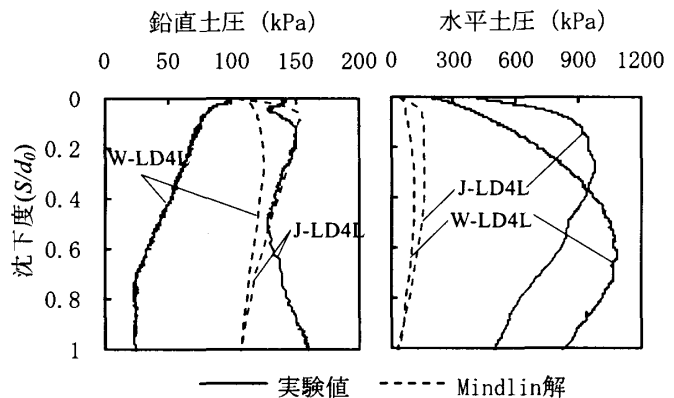


図7 実験値と Mindlin 解との比較 (荷重時)

4. 回転貫入杭に及ぼす薄層厚の影響

図8および図9は回転貫入杭の薄層内および一般地盤内の土圧について薄層厚を変化させて比較したものである。前項と同様に各土圧計の設置深度を破線で示した。

(1) 薄層内土圧の挙動

施工時の水平土圧は薄層厚に関わらず同様の推移となるが、鉛直土圧は薄層厚の大きいLD8LとLDモデルが上載圧負荷時点で負荷した上載圧よりも大きな値を示す。この原因は土圧計の設置方法の影響によるものか不明である。この影響を除いて施工時の値の増減のみに着目すると、どの条件でも概ね同様の結果となった。

載荷時の水平土圧は設置深度50mm程度手前で最大値となり、薄層厚が大きくなるのに比例して最大値も大きくなっている。一方、載荷に伴う鉛直土圧の増減はほぼ同様である。

(2) 一般地盤内土圧

施工時の鉛直土圧は杭先端面が土圧計設置深度に接近しても大きな変化は見られないが、水平土圧は土圧計設置断面から300mm程度手前から増大し、土圧計設置断面通過後も増加を続ける。これは杭の貫入による地盤の側方への移動に加えて、羽根上面の地盤の拘束圧の上昇により地盤内の応力が増加するためだと考えられる。載荷時をみると、鉛直土圧および水平土圧共に載荷直後に値が大幅に減少する。これは沈下の進行に伴って羽根

上部の地盤の応力が解放されるためだと考えられる。その後、鉛直土圧は僅かに増加傾向を示すものの、水平土圧は施工開始前よりも極めて小さな値で一定に推移する。

5. まとめ

本報で得られた主な知見を以下に示す。

- ①. 回転貫入杭の施工時における薄層内の土圧は圧入杭より大幅に小さく、その変動も小さい。
- ②. 鉛直載荷時においては、水平土圧が大幅に増大するのに対して、鉛直土圧はあまり変化しない。これらの挙動はMindlin解で得られるものと大きく異なる。
- ③. 薄層厚の増大に伴って薄層内の水平土圧は増加するが、杭周囲の一般地盤の土圧は鉛直および水平共にほとんど変化しない。

参考文献

- 1) 佐藤光, 土屋勉, 他: 回転貫入杭の施工時応力および鉛直支持力に及ぼす薄層厚の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No82, pp.185-188, 2009.7.
- 2) 石川隆太, 土屋勉, 他: 薄層地盤に施工される各種杭工法の支持力特性に関する模型実験, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No82, pp.189-192, 2009.7.
- 3) 国府田誠, 佐藤秀人, 他: 螺旋羽を持つ回転貫入杭の貫入および支持力に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第601号, pp.91-98, 2006.3.

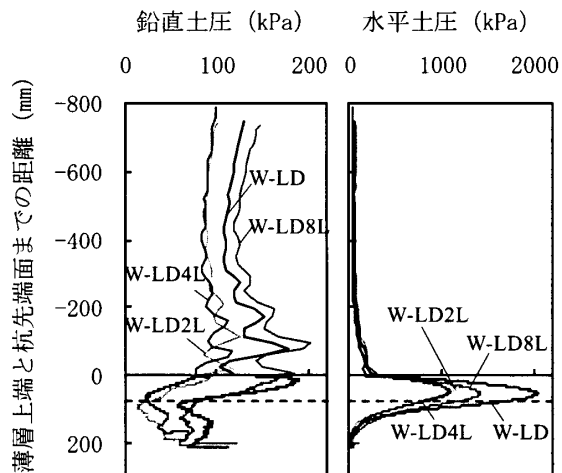


図8 薄層内の土圧の推移(全過程)

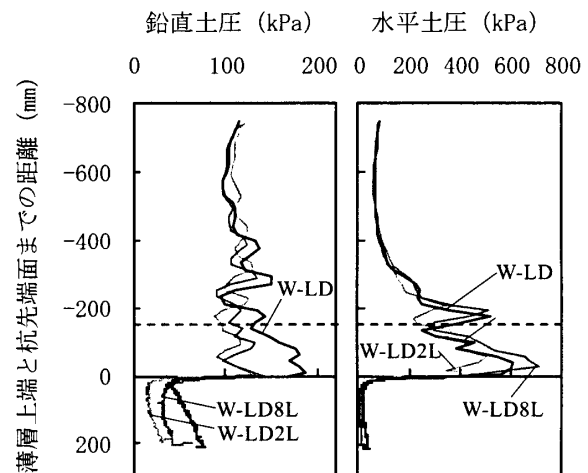


図9 一般地盤内の土圧の推移(全過程)

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程

*2 室蘭工業大学大学院 教授・工博

*3 室蘭工業大学 専門技術職員

*4 (株) ドーコン・工修

*5 大成建設 (株)

Graduate School, Muroran Inst. of Tech.

Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr.Eng.

Technician, Muroran Inst. of Tech.

Docon Co., Ltd., M.Eng.

Taisei Co., Ltd.