

回転貫入杭の施工中における地中応力の検討

正会員 ○島田正夫*¹ 正会員 土屋 勉*²
 正会員 永井 宏*³ 会員外 石川隆太*⁴
 会員外 永沼信洋*⁵

2. 構造－4. 基礎構造－e. 杭（鉛直）
 回転貫入杭，模型実験，地中応力

1. はじめに

著者らは，回転貫入型の杭工法の貫入機構を明らかにすることを目的として，これまで杭体軸部周囲の軸力分布測定¹⁾や羽根近傍を通過する粒状体の観察²⁾を行ってきた。

本報告では，杭施工中における羽根近傍の土圧計による測定値の評価方法を検討した後，施工中の杭体トルクと貫入率の推移を参照しながら，回転推進力を発揮させる羽根刃先および羽根面の作用について考察を行う。

2. 実験装置および実験条件

2. 1 実験装置

図1は施工実験装置であって，大型の円柱加圧土槽，回転貫入装置，計測器等で構成される。回転貫入装置は，杭を1回転あたり4.2秒の一定速度で回転させる性能を有している。

模型杭について，圧入杭は杭径 $d_0=76.3\text{mm}$ の閉端の鋼管であり，回転貫入杭は図2に示すように直径 $d_w=152.6\text{mm}$ の螺旋状の羽根（羽根ピッチ40mm）を1巻き溶接したものであって，鋼管内面に貼付した温度補償型歪ゲージによって杭体軸力や施工中のトルクを計測している。また，施工中の杭体温度の計測を実施してみかけ歪の補正計算を行うことで，計測精度の向上を図っている。

地盤材料は表1に示す性質の東北硅砂6号であり，既報³⁾で述べる方法によって模型地盤を作製している。なお，地盤中に設置した土圧計の仕様は表2に示すとおりであり，杭の施工に伴って発生する杭体および地盤の温度上昇の影響を受けない構造となっている。

2. 2 実験条件

図3は試験体（回転貫入杭2体，圧入杭1体）であって，土圧計は全て杭中心から $2d_0$ 離れた位置に配置した。実験条件を表3に示す。

実験条件 W-1は，施工終了時に薄層地盤 $\sim 1d_0$ 根入れしており，W-2は薄層上端と杭先端が接する位置で施工を終了している。Jは全て一般地盤によって構成される地盤に圧入施工しており，貫入量は他の条件と同様である。

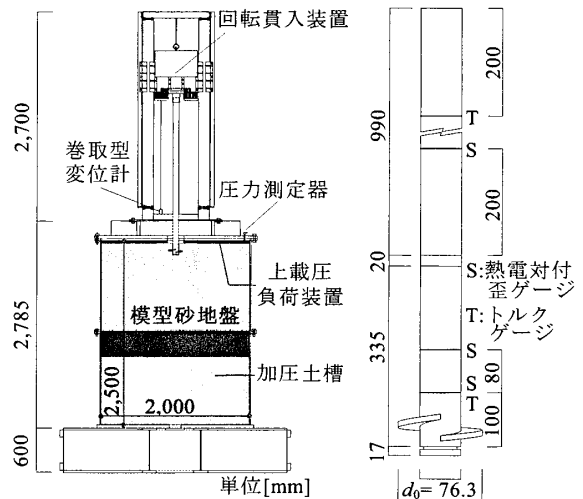


図1 施工実験装置

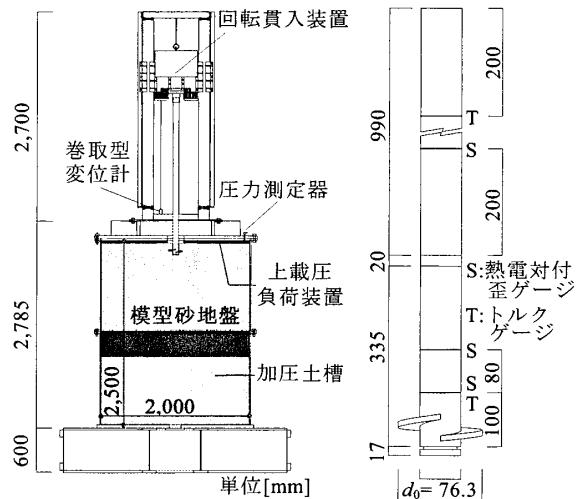


図2 模型杭

表1 砂試料の基本的性質

G_s	U_c	ρ_{dmax} (g/cm^3)	ρ_{dmin} (g/cm^3)	D_{50} (mm)
2.61	2.00	1.71	1.41	0.32

表2 土圧計の仕様

定格容量 (kPa)	定格出力 (μe)	許容温度範囲 ($^{\circ}\text{C}$)	零点・出力 温度影響 (%RO)	寸法 直径/厚さ (mm)	
1000	541~ 555	-10~60	± 0.4 以内	30	6.5

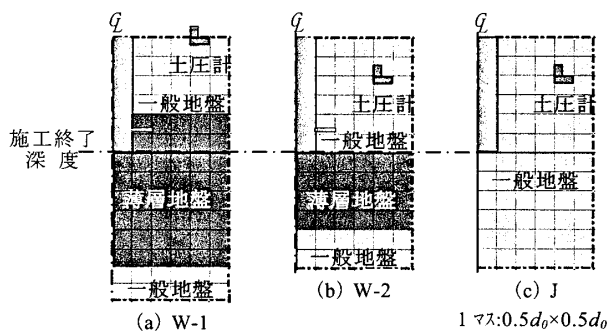


図3 試験体および土圧計位置

Study on soil stresses of around screwed pile in a calibration chamber.

SHIMADA Masao et al.

実験方法は、予め上載圧100kPaを負荷した模型砂地盤に対して、回転貫入杭ではモーターの自重4.2kNを負荷した状態で一定速度で回転施工している。圧入杭は載荷フレームに取り付けた油圧ジャッキによって、荷重制御方式による圧入施工を実施し、施工中の杭体貫入量や杭体軸力分布および杭体近傍の地中応力分布を計測した。

3. 地中応力の評価方法

図4にW-1の施工中に、0.1秒間隔で水平応力を測定した結果と、その計測結果を羽根1回転毎に平均化した値(スムージング)をプロットした。それによると杭が1回転する間に地中応力が大きく変動していることが分かる。図4(a)には、杭が半回転(2.1秒)と1回転(4.2秒)する間隔で抽出した測定値をプロットしたが、杭が1回転する間の限られた位置の値を示しているに過ぎず、スムージングした値とも大きく異なることが分かる。図4(b)には、杭が1/4回転(1.05秒)する間隔で抽出した測定値を示している。0.1秒間隔での計測値と概ね一致しているものの、貫入量600mm付近では水平土圧の最小値について差が生じていることが分かる。

以上の地中応力の計測間隔に関する検討の結果から、本報告では1回転の間に変化する羽根周囲の応力を正確に評価するために、応力の計測間隔を全て0.1秒にすることとした。

4. 実験結果および考察

4.1 トルクおよび貫入率の推移

図5は回転貫入杭施工時の杭頭および羽根部トルクを示したものである。W-1およびW-2は貫入量の増加とともにトルクが緩やかに増加しており、杭先端が薄層上端に接するまでは同様の値を示している。W-1では貫入量700mm付近からトルクの増加傾向がやや強くなっており、杭先端が薄層へ根入れした時点に対応している。なお、杭頭部トルクが羽根部トルクを上回り、杭の貫入に伴ってその差が徐々に拡大するのは、地盤と接する杭周面積の増加による周面摩擦力成分の増大を反映するものである。

図6は回転貫入杭施工時の貫入率 μ を示したものである。ここで μ とは、羽根1回転当たりの貫入量を羽根ピッチ(40mm)で除した値である。 μ の推移は、いずれのモデルとも貫入開始時の約0.6から貫入終了時の約0.4まで一様に減少しており、図5に示したトルクと逆の傾向を示している。なお、トルクおよび貫入率の推移は実験条件の違いに関わらず同様であることから、実験および模型砂地盤の再現性は保たれていると言える。

表3 実験条件一覧

実験名称	W-1	W-2	J	
杭・施工法	羽根付き杭 ・回転貫入		直杭 ・圧入	
地盤条件	薄層 根入れ $1d_0$	薄層 根入れ 無	均一	
上載圧 σ_v' (kPa)	100			
相対密度	薄層	94	94	-
Dr (%)	一般部	59	59	59
薄層厚 (d_0)	4	2	0	

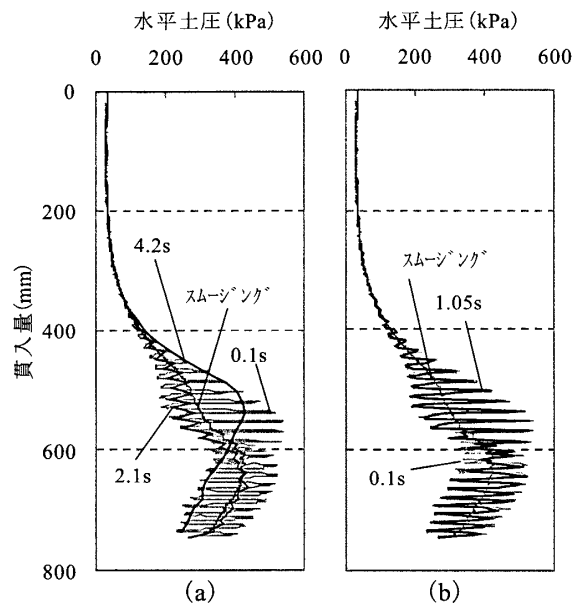


図4 計測間隔による影響(W-1)

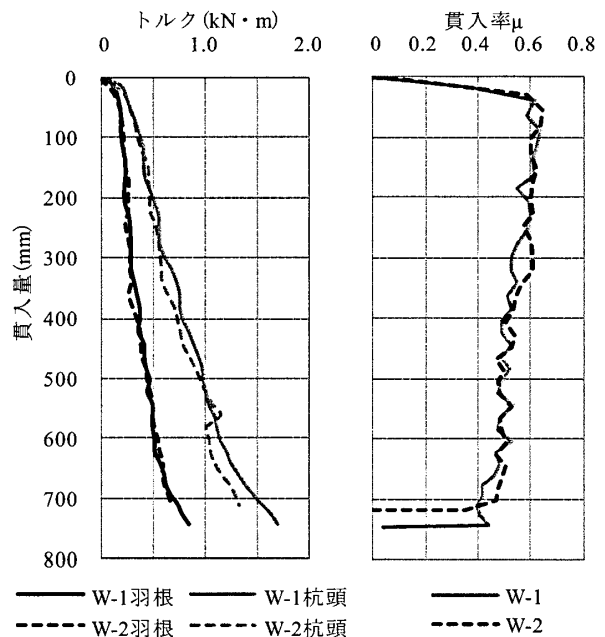


図5 トルクの推移 図6 貫入率の推移

4. 2 地中応力と羽根位置および刃先の関係

本報告では、螺旋羽根と地中応力測定位置の関係を図7のような記号で表した。すなわち、①が羽根始端、⑧が羽根終端であって、刃先で削られた土粒子は相対的に①、②、…、⑧の順に羽根上面を移動することになる。

図8は土圧計と図7の羽根の相対的な位置(①～⑧)に着目して、回転貫入杭施工時の地中応力について、羽根始端から羽根終端までを展開したものである。羽根始端が土圧計設置深度を通過する前後の羽根回転数に応じてプロットした。ここで、羽根回転数の0は土圧計設置深度と羽根深度が同じ時の地中応力であり、-符号は羽根始端が土圧計設置深度を通過する前を、+は通過後を示す。なお、図8に示す区間の1回転あたりの貫入量は羽根ピッチ40mmに対して約18mmである。

羽根が土圧計設置深度を通過する前の段階においては、応力の変化は僅かであるが、土圧計深度と羽根が接近する(170mm程度)のに伴って水平応力が一様に増加する傾向を示す。これに対して鉛直応力は⑤から⑧の範囲で増加していることが分かる。

羽根回転数0の時点では、羽根刃先と法線方向にある⑥近傍の水平応力が増加して施工開始時の約15倍に達している。これに対して鉛直応力は、羽根が土圧計深度を通過する前と同様に値の変動が小さく、水平応力と異なった傾向を示す。

羽根が土圧計設置深度を通過した後は、鉛直応力では②～④の範囲、水平応力では①～③で応力が増加している。これは、羽根上面による貫入推進力が強く発揮される領域に対応した結果であると考えられる。

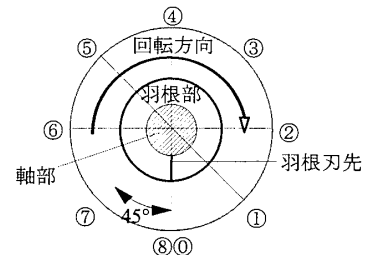
4. 3 地中応力分布

図9は施工中の地中応力分布を杭先端面との関係で示している。(a)は刃先の法線方向(⑥-②)の応力であり、(b)は刃先の接線方向(④-①⑧)の応力である。なお、圧入杭は軸対称体であるため、(a)の②方向のみに示した。

圧入杭の鉛直応力および水平応力は、それぞれ杭先端下 $2.5d_0$ 程度および杭先端下 $1d_0$ で最大値を示す。それに対して回転貫入杭は、方向ごとに最大地中応力を示す位置や最大値が異なっていることが分かる。

水平応力について、W-1では⑥方向の最大応力が羽根と同深度位置で発生しており、羽根刃先の支圧抵抗を反映したものと思われる。その他の方向では羽根より浅い位置に現れているのは、羽根刃先で削られた土粒子が羽根上面を移動することによる推進力によるものと考えられる。

鉛直応力について、W-1およびW-2とも杭先端



①～⑧:相対的な地中応力測定位置

図7 羽根と地中応力測定位置の関係

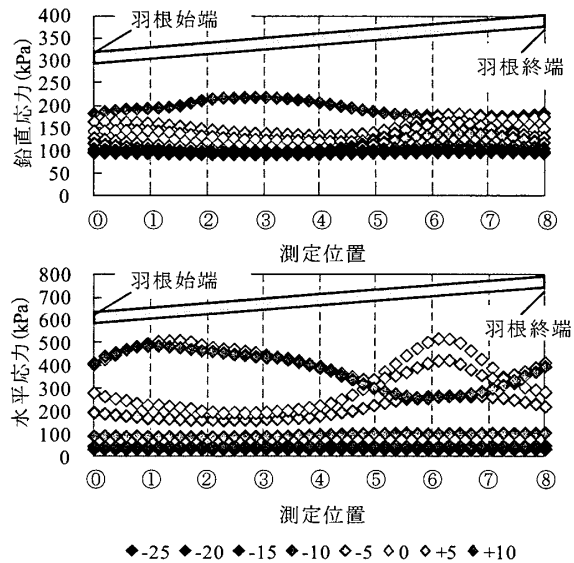
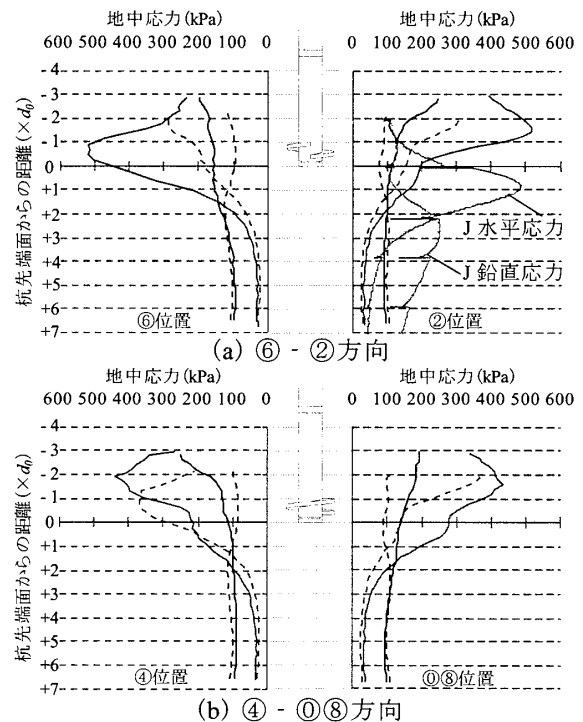


図8 羽根位置と地中応力分布の関係(W-1)



W-1: — 鉛直応力 — 水平応力
W-2: ---- 鉛直応力 ---- 水平応力

図9 地中応力分布

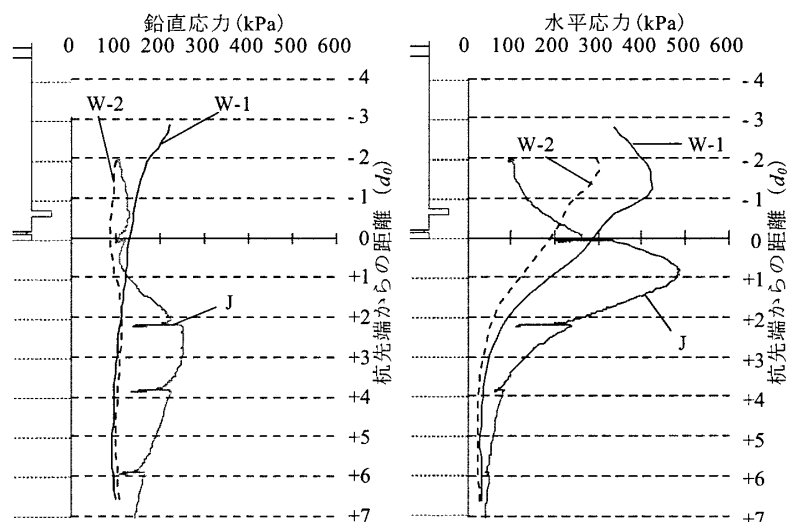


図 10 地中応力分布(全方向平均)

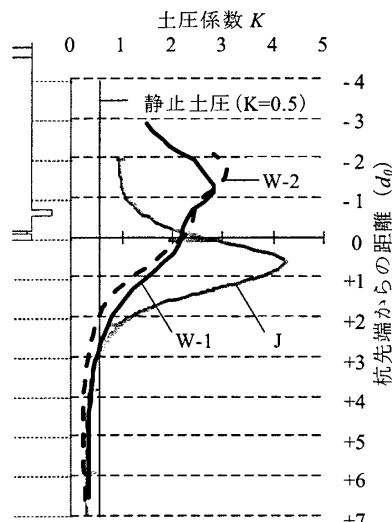


図 11 土圧係数分布

以深は変化が少なくほぼ一様な値を示すが、杭先端以浅では W-2 の値がほとんど変化しないのに対して W-1 では増加しており、特に杭先端距離 -2~ -3 区間では②および④方向で急増している。これは、薄層への根入れに伴った現象であると考えられる。

図 10 は、図 9 で示した全方向の地中応力を平均して表したものである。

圧入杭の鉛直応力および水平応力の最大値が杭先端下にあるのに対して、回転貫入杭は何れの実験条件においても杭先端以深の応力は極めて小さいことから、羽根による杭先端近傍地盤の拘束圧低減効果が認められる。また、最大応力が羽根以浅で発生していることは、羽根上面にまわり込む土の押圧力(回転推進力)の発現に対応した結果であると考えられることから、回転貫入杭特有の応力分布状態をよく表していると言える。

薄層への根入れの影響について、薄層への根入れに対応する W-1 の杭先端距離 -2~ -3 区間では鉛直応力が急増するのに対して水平応力は減少していることが分かる。このことから、根入れ時の推進力となる成分は鉛直方向の応力が支配的であると推察される。

4. 4 土圧係数

図 11 は杭体近傍の土圧係数分布を示したものであり、図 10 の鉛直応力に対する水平応力の比を表している。それによると、杭先端深度が +3~

+2 より浅い深度で受動土圧状態となり、W-1 および W-2 とともに土圧係数のピークが杭先端距離 -1~ -2 の範囲に現れることが分かる。

5. まとめ

回転貫入杭の施工時における地中応力に関して得られた主な知見を以下に示す。

- ①. 施工中の応力測定間隔は 1 回転当たり少なくとも 4 回以上となるよう設定すべきである。
- ②. 羽根近傍の地中応力は羽根刃先および羽根位置による影響を受けて不均等な分布となる。
- ③. 施工によって生ずる最大水平応力の発生深度は、圧入杭では杭先端以深だが回転貫入杭では羽根面より $1d_0$ 程上方深度である。
- ④. 薄層への根入れを行うと、羽根部上方で鉛直応力が急増する。
- ⑤. 杭先端下 $3d_0$ から $2d_0$ 以浅で受動土圧状態となる。

参考文献

- 1) 大杉富美一, 土屋勉, 他: 大型加圧土槽を利用した回転貫入模型杭の貫入実験, 日本建築学会構造系論文集, No.591, pp.69-75, 2005.5
- 2) 土屋勉, 中沢楓太, 他: 回転貫入杭の羽根近傍地盤の観察に基づく貫入メカニズムの検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.25, pp.73-76, 2007.6
- 3) 石川隆太, 土屋勉, 他: 薄層地盤における模型杭の施工時および荷重時の地中応力, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.83, pp.139-142, 2010.7

- | | |
|--------------|-----------|
| *1 室蘭工業大学 | 専門技術職員 |
| *2 室蘭工業大学大学院 | 教授・工博 |
| *3 室蘭工業大学大学院 | 助教・博士(工学) |
| *4 清水建設(株) | 修士(工学) |
| *5 戸田建設(株) | |

Chief Technical Official, Muroran Inst. of Tech.
 Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr.Eng.
 Assistant Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr.Eng.
 Shimizu Co., M.Eng.
 Toda Co.