

(71) 液状化過程における孔あき杭の水平抵抗について

運輸省港湾技術研究所 正会員 野田 節男  
住友金属工業(株) 正会員○喜田 浩  
住友金属工業(株) 正会員 飯田 毅

1. まえがき

著者らは、排水機能を有する孔あき鋼管杭を用いた液状化対策工法について基礎的研究<sup>1)~5)</sup>を進めている。本工法は、大きな強度・剛性に加え排水機能を有する孔あき鋼管杭を活用するものであり、設計にあたっては、液状化過程での杭近傍の地盤強度の状態を把握する必要がある。

道路橋示方書・同解説V耐震設計編では、室内平板載荷実験で得られた鉛直地盤反力係数と過剰間隙水圧の関係<sup>6)</sup>に基づき、液状化に対する抵抗率( $F_L$ )に応じ地盤定数を設定している。しかし、水平地盤反力係数については未解明な部分が多い。そこで、室内平板載荷実験と砂箱加振終了直後に杭に水平載荷する模型実験を実施し、過剰間隙水圧存在下での地盤反力係数と過剰間隙水圧の関係を検討したので報告する。

2. 実験概要

2.1 平板載荷実験<sup>1)</sup>

実験ケースを表1に示す。実験は図1に示すように内径688mmの鋼製円筒土槽に厚さ300mmの飽和砂層を作成し、一定拘束圧(1kgf/cm<sup>2</sup>)のもとで順次砂層内の間隙水圧を上昇させ、外径60mmの平板で砂層面に載荷した。さらに、上記土槽内に内径300mmの鋼製円筒枠を設け、同様の実験を実施し、土槽寸法の影響を検討した。用いた砂は豊浦標準砂および千葉県産山砂( $G_s=2.68, D_{50}=0.38\text{mm}, U_c=3.21$ )の2種類で、主な計測項目は荷重、貫入量、過剰間隙水圧である。

2.2 加振終了直後の杭の水平載荷実験

実験の種類を表2に、模型の概要を図2に示す。実験は砂箱(11mX11mX2m)の中央にφ22mmXt1mmXl900mmのホリカホネ製杭を下端固定し、厚さ700mmの飽和砂地盤を形成し、振動数3Hzの正弦波を加速度1ガル、波数を変化させ加振した直後に杭頭部に水平載荷することを順次繰返して行った。載荷は杭頭からワイヤで砂箱に取付けた滑車を介して0.5kgfの重錘を吊下げる方法による。用いた砂は上記の千葉県産山砂で、杭の曲げ剛性は孔あき杭が $EI=8.23 \times 10^3 \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ 、孔なし杭が $EI=1.09 \times 10^4 \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ である。主な計測項目は、過剰間隙水圧、加速度、杭変位、杭ひずみである。

表1 平板載荷実験(拘束圧:1kgf/cm<sup>2</sup>)

実験ケース	使用砂	土槽径(mm)	水圧比	相対密度(%)
1	-1 豊浦標準砂	688	0~0.8 (0.2ビッチ)	47.7
	-2 千葉産山砂	300		57.8
2	-1 豊浦標準砂	688	0.9, 1.0	58.5
	-2 千葉産山砂	300		50.7

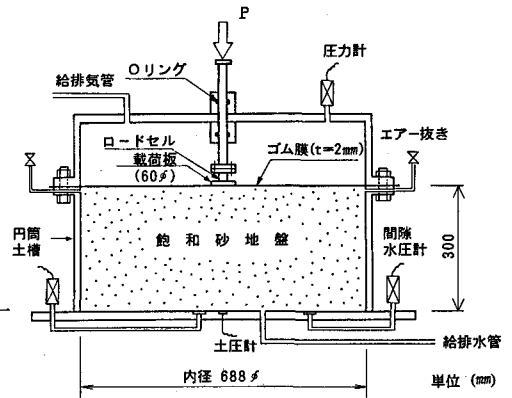


図1 実験概要<sup>1)</sup>

表2 加振終了後の杭の水平載荷実験

Case	杭種	加振レベル(Gal)	波数	荷重(kgf)	備考
1	孔あき杭	94, 120, 141	2, 4, 6 8, 10	0.5	*孔あき杭の開口率5.6% *加振周波数3Hz
		188			
2	孔なし杭	86, 116, 143	2, 4, 6 8, 10	0.5	

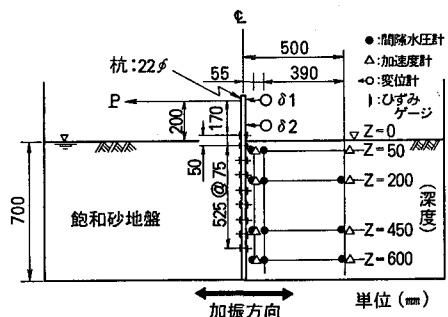


図2 模型の概要

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 平板载荷実験

鉛直地盤反力係数 $k_v$ を過剰間隙水圧 $\Delta u$ が零のときの値 $k_{v0}$ で正規化した $k_v/k_{v0}$ と過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ の関係を図3に示す。図中実線は内径300mmの土槽を用いて得られた常田<sup>6)</sup>らの結果である。図より、過剰間隙水圧の上昇につれ鉛直地盤反力係数が低減すること、砂の種類の影響が小さいこと、地盤がゆるがめ土槽寸法の影響が小さく常田らの結果と概ね一致することなどがわかる。

#### 3.2 加振終了後の杭の水平载荷実験

##### (1) 過剰間隙水圧、杭ひずみ、杭頭変位

加振にひきつづき杭の水平载荷完了までの経時変化例を図4に示す。図4(a)に示す過剰間隙水圧の経時変化から孔あき杭の排水効果により過剰間隙水圧の上昇が十分に抑制されていることがわかる。図4(b)、(c)に示す杭ひずみ、杭頭変位の経時変化では過剰間隙水圧比のそれと同様、孔あき杭の場合の動的振幅がいずれも小さい。これらの結果から、孔あき杭は過剰間隙水圧の上昇に伴う杭周辺地盤の強度低下をその排水機能により抑止するものと考えられる。

##### (2) 水平载荷開始時の過剰間隙水圧の深さ方向分布

水平载荷開始時の過剰間隙水圧の深さ方向分布につき各測線毎に孔あき杭、孔なし杭の結果を比較し図5に示す。これより、141Gal加振の孔あき杭では地盤の深さ方向にわたり過剰間隙水圧の上昇が抑制されること、その効果は深いところで有効であることなどがわかる。また、188Gal加振の孔あき杭は143Gal加振の孔なし杭と同様の分布を示すが、この結果も排水効果によるものと考えられる。

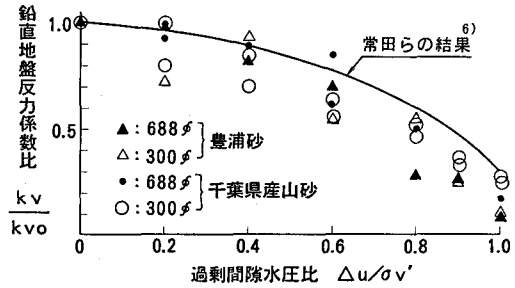


図3 鉛直地盤反力係数比と過剰間隙水圧比

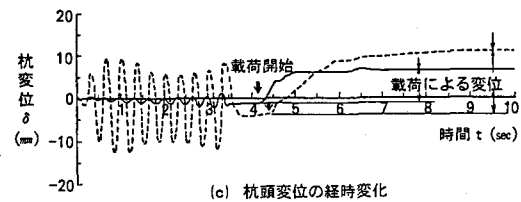
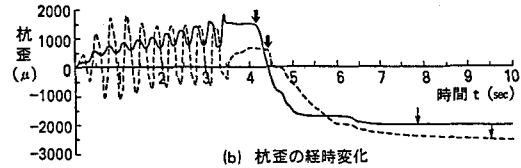
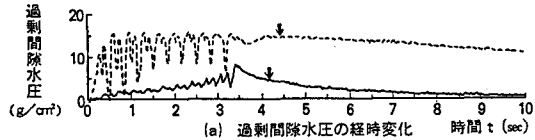
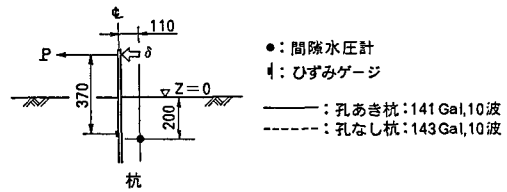


図4 各計測値の経時変化

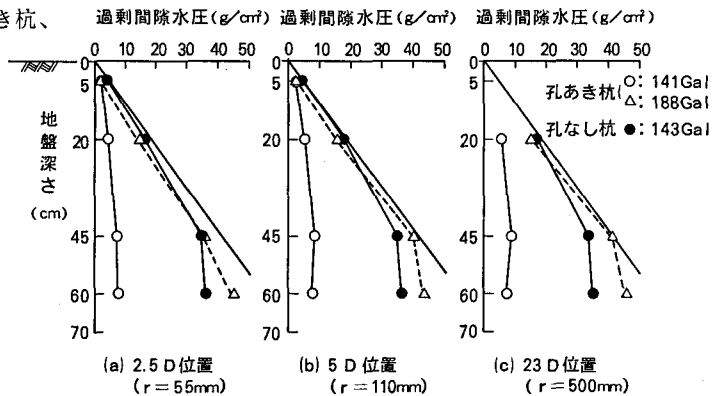


図5 水平载荷開始時の過剰間隙水圧の深さ方向分布 (3 Hz, 10波加振)

### (3) 孔あき杭の水平抵抗

#### (a) 水平載荷時の杭の挙動

孔あき杭および孔なし杭の場合について、加振前および加振終了直後の水平載荷時の杭の挙動を図6に示す。図6は、①杭の曲げモーメントの実測値、およびこの曲げモーメント分布に対する回帰曲線(各実測値とその間を直線内挿した値に7次式を適用)、②回帰曲線より求めた杭に作用する土圧分布、③土圧分布と同様に求めた杭の変位分布、④土圧分布と変位分布から算出した水平地盤反力係数(以下 $k$ 係数と記す)の分布を示す。なお、加振終了直後の結果には⑤載荷開始時の過剰間隙水圧比の深さ方向分布を併記している。図6の各①図より、加振前では孔あき杭、孔なし杭ともモーメント分布の零点が深度250mm程度に見られるが、加振終了後では、孔あき杭のモーメント分布の零点の移動は小さいものの、孔なし杭のそれは大幅に深くなることわかる。また、図6各⑤図より、過剰間隙水圧比は孔あき杭の方が孔なし杭よりも小さく、孔あき杭の排水効果により地盤の強度低下を十分抑止していることがわかる。この他、図6各③図に示すように、回帰曲線から算定した杭変位分布は、杭変位の実測値と概ね一致していることから、土圧分布、 $k$ 係数分布も杭-地盤系の挙動をある程度表現し得ていると考えられる。そこで以下において、本手法に基づく $k$ 係数分布を用い、過剰間隙水圧比との関係を検討することとした。なお、図に示す $k$ 係数分布は、その最大値を示す深度あるいは杭変位の第1不動点までの結果である。それ以深については、杭の変位がきわめて小さくなるため、分布モードの物理的な意味が小さいことから省略した。

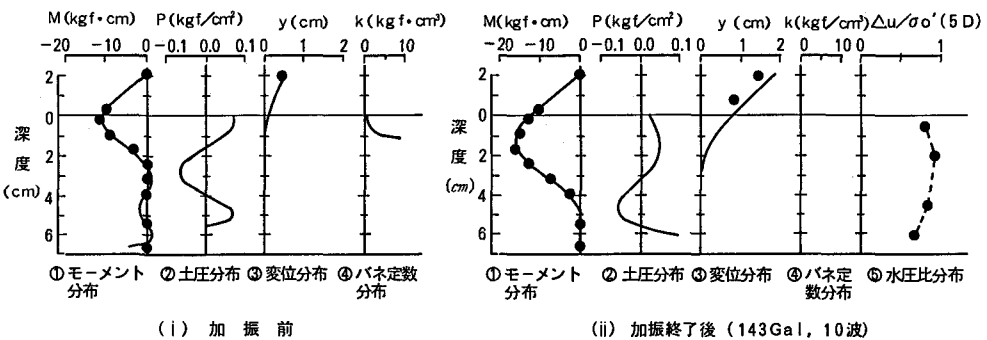
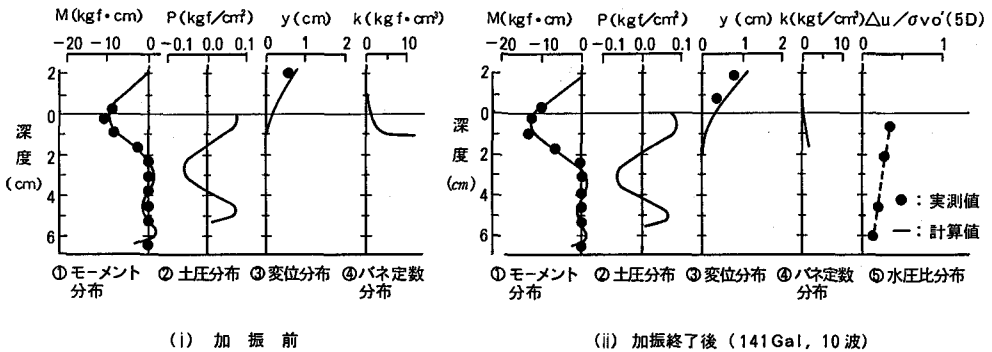


図6 水平載荷時の杭の挙動

## (b) 水平地盤反力係数比と過剰間隙水圧比

液状化地盤中の孔なし杭の水平抵抗については、2, 3 検討されている<sup>7)</sup>が、孔あき杭については排水効果の及ぶ領域により水平抵抗が変化することが予想され、その検討は殆どなされていない。本実験では、図5において過剰間隙水圧が孔あき杭から500mm離れた領域まで一様であることから、排水効果が及ぶ領域は砂箱全体と考えられる。そこで、水平地盤反力係数比と過剰間隙水圧比の関係を検討するにあたって、過剰間隙水圧比には杭芯より110mm、地表より200mm深さの点における値を採用し、水平地盤反力係数比については

(3) (a)で得られた $\bar{n}$ 定数分布を深さ方向に一定の $\bar{n}$ 定数で代表させるため、杭の第一不動点深さの $1/3$ 点での $\bar{n}$ 定数値を用いるChangの考え方<sup>8)</sup>を準用した。

以上により、表1の各条件での加振終了直後の杭の水平載荷で得られた水平地盤反力係数比と過剰間隙水圧比の関係を図7に示す。図より、加速度 $141\text{Gal}$ の孔あき杭の結果は水平地盤反力係数比が比較的大きなところに集中している。これは孔あき杭の排水効果が砂箱全域に及び、発生した過剰間隙水圧が小さく地盤の強度低下を抑制することによる結果と考えられる。一方、加速度 $143\text{Gal}$ の孔なし杭の水平地盤反力係数比は孔あき杭の結果よりも小さい。これは発生した過剰間隙水圧が大きく、地盤強度が深さ方向にわり低下することによると考えられる。また、 $188\text{Gal}$ の孔あき杭では、過剰間隙水圧比が $0.5 \sim 0.8$ の間で水平地盤反力係数比が $0.1$ 前後に急激に低下している。この現象は孔なし杭にもみられることから、過剰間隙水圧比 $0.5$ 付近以上で地盤性状が変化したものと考えられる。さらに、過剰間隙水圧比 $0.3 \sim 0.5$ の水平地盤反力係数比については、孔あき杭の値が孔なし杭よりも大きい。この理由として、実験が同一模型に加振および水平載荷を繰返していることから、孔あき杭では順次地盤強度が増加するのに対し、孔なし杭ではその増加度が小さく、かつ、杭表面が地中水の上向き流れの流線を形成し杭直近の地盤強度を低減することが挙げられる。

以上より、水平地盤反力係数比は過剰間隙水圧比 $0.5$ 付近まで直線的に低下し、 $0.5$ 以上では $0.1$ 程度に減少すること、図3に示した鉛直地盤反力係数比と比較すると、過剰間隙水圧比の増加に伴ないその低減度は水平地盤反力係数の方が著しいことなどが判る。

### 4. あとがき

平板載荷実験および砂箱加振終了後に杭を水平載荷する模型振動台実験より以下の点が明らかとなった。

- ① 孔あき杭は過剰間隙水圧の上昇に伴う杭周辺地盤の強度低下をその排水機能により抑止する。
- ② 地盤反力係数は過剰間隙水圧比の増加とともに低減し、鉛直地盤反力係数は常田らの結果と概ね一致した。一方、水平地盤反力係数の低減度は鉛直地盤反力係数のそれより著しく、過剰間隙水圧比が $0.5$ まで直線的に低下し、それ以上で $0.1$ 程度を示した。

以上、実験および解析検討により液状化過程における杭設計の基礎データが入手できた。

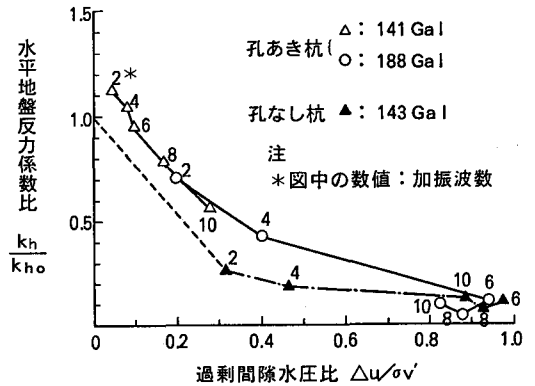


図7 水平地盤反力係数比と過剰間隙水圧比 (3 Hz, 2~10波加振)

参考文献: 1)野田、喜田、飯田、寺澤:孔あき杭による盛土の変状抑止に関する模型実験、第24回土質工学研究発表会、平成元年 2)飯田、喜田、才村:孔あき杭による既設岸壁の液状化対策に関する一検討、土木学会第43回年次学術講演会、昭和63年 3)喜田、飯田、飯村:孔あき杭の排水効果に関する模型実験、土木学会第43回年次学術講演会、昭和63年 4)野田、喜田、飯田、飯村:孔あき杭の液状化抑止に関する模型実験、第23回土質工学研究発表会、昭和63年 5)野田、飯田、喜田、才村:孔あき杭による既設岸壁の液状化対策に関する模型実験、第23回土質工学研究発表会、昭和63年 6)常田、木全、吉田:地盤の流動化特性およびその影響に関する実験的検討、第16回土質工学研究発表会、昭和56年 7)例えば、佐々木、松本、近藤:液状化地盤中の杭の水平載荷実験、土木技術資料29-11(1987) 8)横山:くい構造物の計算法と計算例、山海堂、昭和53年