報文 摩擦杭の液状化時の挙動

吉田　望*／小林　恒一**

1．はじめに

摩擦杭は支持杭と並び，基盤が深いときに構造物を支える基礎構造形式として代表的なものである。両者はそれぞれ長所と短所がある。摩擦杭は地盤沈下に対して構造物が地盤とともに沈下していくので，支持杭に見られるようなネガティブフリクションのような問題や地表で構造物との間に段差が生じないという長所がある。しかし，一方では摩擦杭の適用性は限定的であるといわれている。たとえば，液状化が発生すると杭と地盤の間の摩擦が期待できないことから，その影響を考慮した詳細な検討[1]が必要となり，実務では適用されていないのが現状である。しかしながら，地震時の被害を見ると，このような摩擦杭に対する考え方は必ずしも正しくないように見える。そこで，本稿では過去の液状化地盤における摩擦杭のパフォーマンスを示すことによって，摩擦杭が液状化地盤でもその役目を十分に果たすことを示す。

2．1995年兵庫県南部地震

兵庫県南部地震では，ポートアイランド，六甲アイランドという2つの人工島をはじめ，神戸市の護岸背後地盤の多くで液状化が発生し[2]，また，杭の被害も多数発生した[3),4]。しかし，兵庫県南部地震による基礎の被害事例調査から，節杭（摩擦杭）を用いた建物については建物・基礎ともに，支持杭の被害事例[3]に比べれば，ほとんど無被害であった[4),5]。ここでは，液状化地盤における摩擦杭（節杭）の挙動として，六甲アイランドとポートアイランドでの調査結果を紹介する。

ポートアイランドでは液状化対策が行なわれていた部分を除いてほぼ全島が液状化したのに対して，六甲アイランドでは液状化範囲は北側に集中している。これは，埋立材料が異なり，ポートアイランドや六甲アイランドの北ではまさ土が用いられたのに対して，六甲アイランドの南では神戸層群の砂岩・泥岩・凝灰岩などが用いられているためである[6]。

筆者らによる調査[5]によれば，ポートアイランドで8例，六甲アイランドで50例の摩擦杭（節杭）の施工事例があり，いずれもPHC節杭である。これらの人工島（埋立地）の埋立層厚はポートアイランドで20m弱，六甲アイランドでは35m程度である[6]。一方，用いられている杭は杭長が4～25m（12m前後の実績が多数）で，節杭はϕ400～300（節部径440㎜，軸部径300㎜）およびϕ500～400（節部径500㎜，軸部径400㎜）が多数を占める。また，節杭の施工法には打込み工法と埋込み工法があるが，埋込み工法が比較的多い。これらの節杭の設計支持力は約300kN/本程度のものが多い。

液状化現象が見られた建物のボーリング柱状図と杭長（打込み工法）の例を図-1[5]に示す。この例に見られるように，節杭は典型的な摩擦杭として用いられている。建物周辺で噴砂が見られたにもかかわらず，建物や杭の被害は見られない。図-2，図-3には変状の詳細調査例[7]を示す。ここで，沈下量には地震前の圧密による成分があるので，すべてが地震による沈下というわけではない。図-2では杭のない土間中央部分の沈下が大きいが，機能上の問題は起きていない[7]。また，図-3では，沈下量その

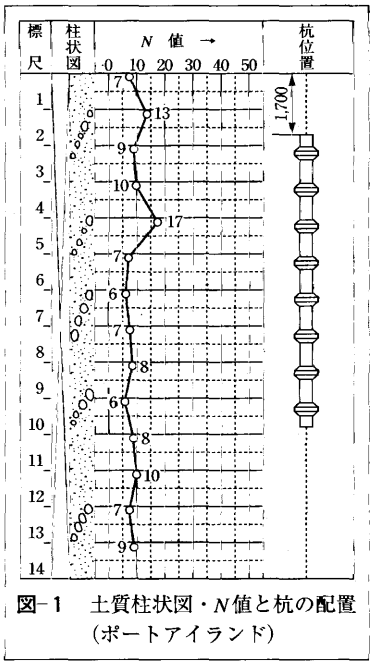

図-1　土質柱状図・N値と杭の配置（ポートアイランド）

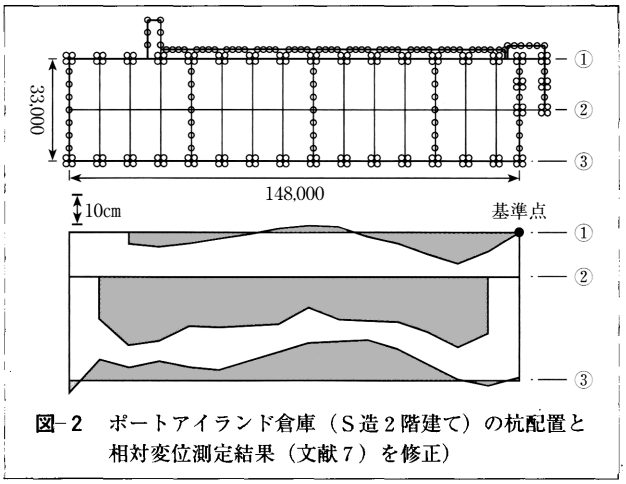

図-2　ポートアイランド倉庫（S造2階建て）の杭配置と相対変位測定結果（文献7）を修正）

＊YOSHIDA Nozomu　東北学院大学 工学部 環境土木工学科 教授｜宮城県多賀城市中央1―13―1
＊＊KOBAYASHI Kōichi　ジャパンパイル㈱ 技術開発部｜東京都中央区日本橋浜町2―1―1

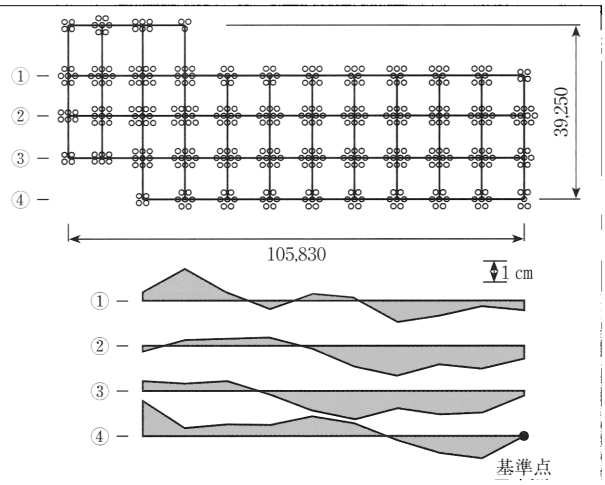

図-3　六甲アイランド物流センター（S造4階建て）の杭配置と相対変位測定結果（文献7）を修正）

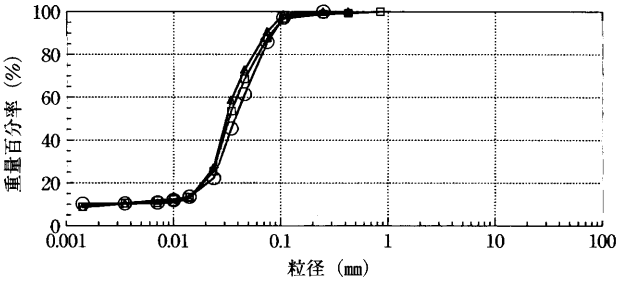

図-5　竹内団地の粒度分布（文献10）より抽出）

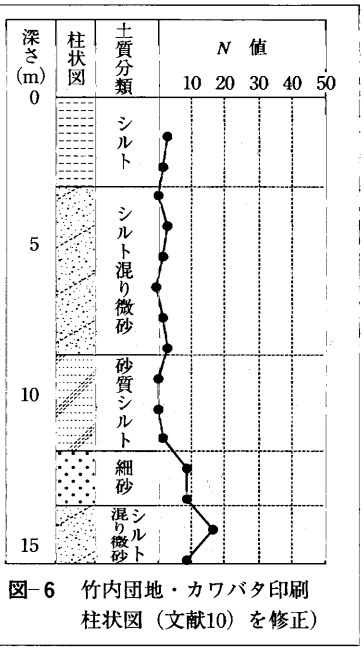

図-6　竹内団地・カワバタ印刷柱状図（文献10）を修正）

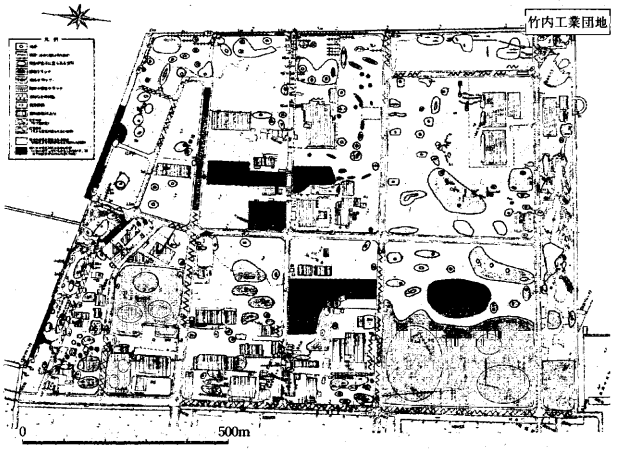

図-4　竹内団地の噴砂[8]

ものが非常に小さい。また，いずれの場合でも構造物被害はなかった。

この地震では，護岸（ケーソン護岸）が支持地盤の液状化によって生じた海側への移動したことに伴い，背後地盤では液状化に伴うが発生している。しかし，そのような護岸のごく近傍（数メートル）において行なわれた掘起こし調査においても杭の被害は見られていない[7]。さらに，次に述べる竹内工業団地のような建物の抜上がり現象もほとんど見られていない。すなわち，支持杭に比べれば格段によい性能を示している。

3．2000年鳥取県西部地震

2000年鳥取県西部地震でも広範囲で液状化が発生した[9]。中でも竹内工業団地の液状化は，技術者の興味を引くものであった。この工業団地は1978～1986年に周辺の海底の土を浚渫し埋立されたものであり，1997年にはこの地で山陰・夢みなと博覧会が開催されている。図-4に2000年鳥取県西部地震におけるこの団地の液状化範囲[9]を示すが，団地内のほぼすべてで液状化が発生している。ここで，技術者に興味深いというのは，図-5に粒径加積曲線[10]を示すように，液状化したのはシルト分含有率の非常に多い砂というより，シルト地盤であるということである。このため，筆者らの調査でも地震後数日たっても地面から水がわき上がっているところがあった。図-6に，このサイトの代表的な柱状図を示すが，浚渫により作られた地盤ということでGL－12m程度までは埋立てられた材料，これ以深は旧海底地盤である。このうち，埋立部分が液状化したのは確からしいが，旧海底地盤が液状化したという証拠はない。

この団地の地盤では，一般的に支持杭の支持層に相当するN値50以上の地盤はGL－30m以深にある。また，団地内の大半の建物は低層の倉庫，工場，販売店であり，上部の構造形式はほとんどが鉄骨造である。そのため，基礎形式としてGL－30m以深の地盤を支持層とする支持杭形式は存在せず，建物の8割以上の34件は節杭φ400～300（節部径440mm，軸部径300mm）およびφ500～400（節部径500mm，軸部径400mm）を用いた摩擦杭形式である[11]。施工は，砂利を充填しながらの打込み工法（7件），またはセメントミルク工法を改良した埋込み工法（27件）で行なわれている。

摩擦杭の杭長は10～15mが多い。これは，前述した地盤構成より埋立層の厚さが約10mであることから，杭の長期鉛直支持力の確保のため，杭先端を旧海底地盤に1～2m根入れしたからと考えられる。

前述のように，鳥取県西部地震によりこの団地ではほぼ全域で液状化が発生した。特に南部と西部で噴砂が多く見られている。液状化が発生した地盤での摩擦杭建物の状況は次のようであった。

① 34件の建物の中で，不同沈下や損傷などの構造的な被害が見られたのは2例で，それ以外の建物の構造的な被害は全く見られなかった。

② 建物と地盤との間には**写真-1**に例を示すように，20～30cmの段差（建物の抜上がり現象）が生じた建物が見られた。このような現象が見られた建物のボーリング柱状図と杭長（打込み工法）の1例を**図-7**[12]に示す。これは，杭先端が支持地盤として働いたことを示している。

写真-1 構造物と地盤の段差[9]

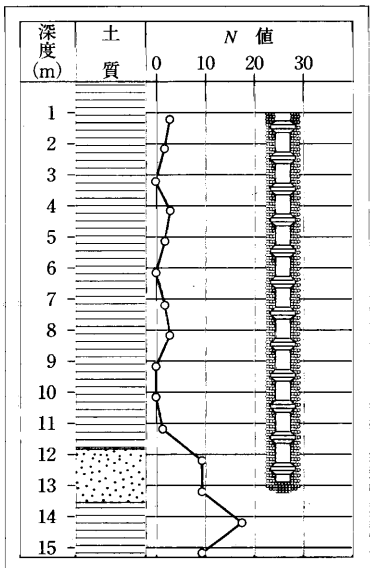

図-7 土質柱状図・N値と杭の設置

③ 土間床では，液状化に伴う抜上がり現象によって床下に空洞ができると，重い機械等が設置された床にはひび割れや沈下などの被害が見られた。これが，①で示した2つの建物被害である。一方，床荷重が軽い場合には土間床に大きな被害は見られなかった。また，構造床の場合には，床荷重に関係なく，大きな損傷は見られなかった。

この地域の節杭（杭径440～300㎜）は長期許容鉛直支持力を140～300kN/本として設計されたものが多い。一方，杭先端支持力R_pは先端N値が10～20であれば300～600kN/本（$=200N_p \cdot A_p$；ここで，N_p：杭先端平均N値，A_p：節杭閉塞断面）となり，液状化により杭周面摩擦力がゼロになったとしても，長期支持力は杭先端支持力で確保できることがわかる。このため，地盤が液状化等により沈下した場合でも，杭は先端地盤で支持されていたので，建物の抜上がり現象が見られたと考えられる。

4. おわりに

2つの地震のいずれも液状化が著しい地域の摩擦杭の被害調査結果を紹介したが，いずれのケースでも摩擦杭のパフォーマンスは非常によいことがわかった。また，ここで示した2つの地震以外の地震，1978年宮城県沖地震，1983年日本海中部地震，1993年釧路沖地震などでも摩擦杭の調査が行なわれ，ほとんど被害が起きていないことが確認されている[7]。

鳥取県西部地震の事例では，結果的に支持杭として作用したため建物の抜上がりが発生した事例もあったことを紹介したが，すべての建物で**写真-1**のような段差が見られたのではなく，段差のない建物もあった。また，兵庫県南部地震では建物の抜上がりの事例は見られなかった。これらのケースでは地盤と構造物が同時に沈下しているので，先端支持力が発揮されたわけではない。また，先端でない杭のどこかで支持力を発揮しているとすれば，やはり段差が生じるはずであるので，この可能性もない。したがって，摩擦杭とその周辺の地盤が一体として挙動していたと考えられる。

摩擦杭（節杭）を用いた建物・基礎が液状化地域で被害を受けなかったのは，①打込み工法の場合には排水効果や地盤の締固め効果が液状化対策効果を発揮，②摩擦杭基礎は液状化地盤と一緒に同沈下，③液状化層により建物への入力地震力が低減などが要因であると報告されている[7]。しかし，多くの施工例は埋込み杭であり，①の効果が発揮されたわけではない。また，③は構造物の慣性力被害については当てはまるかもしれないが，沈下に対しては当てはまらない。このように考えると，②にある摩擦杭基礎が地盤と一緒に沈下したことが被害が小さかった原因と考えられる。

この理由であるが，杭はかなり密に配置されているので，囲まれた範囲の土はせん断変形が拘束され液状化しなかった，または，摩擦杭なので基礎スラブと地盤が接しているので，建物荷重による「押え効果」により建物直下の液状化の発生が抑えられたこと，さらに液状化したが周辺地盤の方が液状化の程度が大きかったため，直下から側方に移動することができず，そのため杭を含む領域が一体として挙動したことが考えられる。

これまでに示したように，液状化地盤でも摩擦杭のパフォーマンスはよい。そのメカニズムが明らかになり，液状化地盤でも使われるようになることを期待したい。

■参考文献

1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2002.
2) 濱田政則，磯山龍二，若松加寿江：1995年兵庫県南部地震 液状化，地盤変位及び地盤条件，地震予知総合研究振興会，p. 194，1995.
3) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書，1996.
4) 建設省建築研究所：兵庫県南部地震における液状化・側方流動に関する研究，建築研究報告，No.138，2000.
5) ジオトップ：平成7年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災），節杭を用いた建物の調査報告書，1996.
6) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査（ポートアイランド，六甲アイランド）報告書，1995.
7) 金井重夫，小椋仁志，須見光二：摩擦杭基礎の地震に対する安全性，基礎工，Vol. 24，No.11，pp. 69～73，1996.
8) 弓ヶ浜半島液状化対策研究会報告書，鳥取県，2001.
9) 平成12年鳥取県西部地震 災害調査報告書，地盤工学会，2000.
10) 平成12年（2000年）鳥取県西部地震調査報告書，基礎地盤コンサルタンツ，2000.
11) 平成12年（2000年）鳥取県西部地震 節杭を用いた建物の調査報告書，ジオトップ，2000.
12) 小椋仁志，細田光美，吉塚昭広：鳥取県西部地震で液状化した埋立地における摩擦杭（節杭）を用いた建物の状況，第36回地盤工学研究会発表会，pp. 1725～1726，2001.