

杭基礎のトラブル事例から学ぶ

(その2：トラブル事例の紹介と原因・対策)

富 永 晃 司 (とみなが こうじ)

広島大学名誉教授

1. はじめに

前号に掲載の「杭基礎のトラブル事例から学ぶ」(その1)(以降、前講座と略記)で述べたように、杭は上部構造からの荷重を地盤に伝えるために地盤内に設けられる構造部材である。この杭を支持する地盤は、地盤改良などを施さない場合、自然材料そのものである。すなわち、その地点が過去に受けた地質学的な生成過程(浸食、堆積あるいは風化等々)の違いによってその特性は千差万別である。また、地層構成は層状を成すが、場所によってその層状は複雑に変化する。

我々は、杭を施工する前に、このような地盤内の状態を直接確認することは不可能に近い。実際には地表面から行うボーリングやサンプリングあるいはサウンディング等の間接的な方法で地盤内情報を得ることになる。

一方、前講座で紹介したように、杭基礎としては数多くの杭種や施工法が開発され、実用に供されている。したがって、採用する杭基礎に対して基本的な事項が把握できたとしても、その杭基礎特有の設計法や施工法に関する情報、あるいは検討すべき事項などが見過ごされる可能性がある。そして、いずれの杭基礎においても、間接的な施工管理により地表面から手探りの状態で地盤内に杭を施工することになる。

上述したように、上部構造を支持している杭基礎においては、杭周辺地盤の特性把握が不十分になる可能性があること、そして手探りの施工になるために品質管理が難しいことなど、上部構造に比べてトラブルになる要因が多く存在している。さらに、施工中のトラブルに関する情報が公にされない傾向にあるため、同じようなトラブルを発生させる轍(てつ)を踏むことになる。このように情報が公にされない状況の中で、杭基礎に関するトラブル事例を紹介した地盤工学会編「トラブルと対策シリーズ①：杭基礎のトラブルとその対策」¹⁾(以降、杭基礎トラブル集と略称)の初刊が1992(平成4)年に発行されている。これは、杭基礎の品質向上に大いに役立つものであり、本講座の読者に一読を勧めたい書籍である。

本講座では、上記の杭基礎トラブル集を参考にして、まず杭基礎で実際に生じる可能性、あるいは生じたトラブルの要因について概説する。ついで、それらの要因によって発生するトラブルに関して、施工法別に事例を示し、それらのトラブルを回避するための対処法あるいは

対策法について解説する。さらに供用時の具体的なトラブル事例として、建物建設後の地盤沈下が原因となる杭の負の摩擦力による上部構造の不同沈下、および地震時液状化が原因となった杭基礎の損傷について紹介する。

2. 杭基礎のトラブル要因とそのトラブル事例

どのようなトラブルにも、必ずその要因が存在する。杭基礎に関するトラブルとその要因との関係を示せば、その概略は図-2.1のようになる。この図において、例えば、施工中の施工管理や施工機械の操作ミスなどによる施工不能、あるいは施工後の想定以上の外力作用による杭体の破壊など、各段階で発生するトラブルの要因がその時に存在する場合は、その原因究明は比較的容易である。しかし、杭基礎に関するトラブルにおいては、その要因のほとんどが前段階に存在しているため、その原因究明は難しい場合が多くなる。

そして、施工中のトラブルは、時間の浪費とある程度の経済的損失を被っても、対処し解決することは可能である。これに対して、最も発生させたくないトラブルは、施工後の建設物供用時に発生するものである。すなわち、建設物の補修あるいは解体・再建設など、その解決策は大掛かりになる場合が多いことを、忘れてはならない。

上述したような杭基礎に関するトラブルとその要因との関係を考えて、杭基礎におけるトラブル回避の最良策は、前段階にその要因の大部分があることを認識することと言えよう。

以下の各節において、杭基礎で発生するトラブルに関連する要因が、施工前、施工中および施工後のどの段階に存在するかについて、解説する。

2.1 施工前のトラブル要因とそのトラブル事例

施工前段階では、実施した地盤調査結果に基づいて具体的な杭種および施工法の選択を行うことになる。しかし、建設しようとする建設物の基礎構造を計画・設計するために必要な地盤調査結果は、特別な場合を除いて存在しない。したがって、建設敷地内で計画・設計に必要な地盤情報を得るための地盤調査を実施することになる。

ここに、地盤調査は事前調査、本調査および追加調査に分けられる。事前調査は建設物の基本計画の段階で行われ、本調査は建設物の基本設計や施工計画に資する地盤情報を得るためのものであって、事前調査の結果を参考として計画される。本調査として、対象敷地内で実施するボーリングやサンプリングあるいはサウンディング

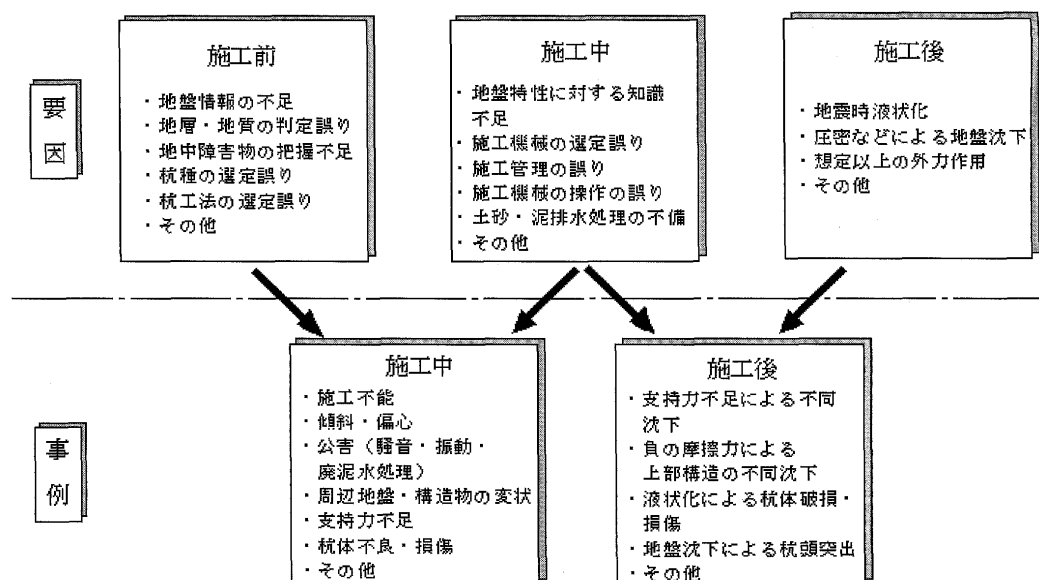


図-2.1 施工前・中・後の各段階における杭基礎のトラブル要因とその事例との関係

等の地盤調査を行うためには、その調査項目、調査地点、調査個数、調査間隔および調査深さなどをあらかじめ決めておく必要があり、そのために事前調査を綿密に行うことが重要となる。なお、本調査の結果からは判断できかねる場合など、より詳しい地盤情報が必要になれば、追加調査を行うことになる。

事前調査としては、まず敷地付近の地盤関係資料を調べることから始め、敷地一帯の地形図・地質図・地盤図などを参照して地盤状況の概要を知る。もし、敷地付近で既に実施されているボーリング調査結果や既設建設物の杭基礎種別・寸法・設計条件などの資料が入手できれば、より身近な地盤状況を知りえることになる。また、その地域の地史や古地図などにより、以前が沼地、旧河川の河川敷、切土地盤、あるいは盛土地盤であることなどが推測され、参考となる場合がある。ついで、敷地付近の現地踏査を行って敷地付近の地形や地表面の状況を観察し、地盤関係資料とあわせて判断すれば、本調査により基本設計や施工計画に資する適切な地盤情報を得ることができる。

杭基礎トラブル集²⁾によれば、適切な地盤情報を得ていなかったことが原因とみられるトラブル事例とその要因として、以下の事項が示されている。

- ① 杭体の損傷：転石、砂礫等のかみ込み、粘性土の閉塞、支持層の傾斜など
- ② 杭の高止まり、打止まりなし：転石、砂礫、流木などの地中障害物、調査不足による支持層の誤認など
- ③ 孔壁崩壊：中間細砂層や砂礫層の崩壊、地下水位変動、逸水など
- ④ 杭の傾斜・偏心：支持層傾斜、転石、地中障害物など
- ⑤ 支持力不足：調査不足により支持層に達していないなど
- ⑥ 上部構造の不同沈下、支持力不足：地層判定の誤

りなど

⑦ その他：地下水の噴出など

なお、これらのトラブル事例としては、主に①、②は打込み杭工法、そして③は埋込み杭工法および場所打ち杭工法などに関係する施工法特有の事例であり、④～⑦は施工法共通の事例であることを付記しておく。

また、得られた地盤情報などに対して、計画・設計段階での確かな情報把握が出来ていなかったことが要因となるトラブルもある。杭基礎トラブル集³⁾では、杭基礎で発生したトラブルのアンケート調査結果から計画・設計に起因するトラブルの種類と発生頻度を、各検討項目別、杭種類別にまとめた表-2.1が示されている。さらに、これらの中から特に発生頻度の多いトラブルの発生パターンをまとめ、以下の要因と事例の関係を挙げている。

- ① 地層・地質の判定誤り（支持層選定の不適当）：
杭体不良、損傷および施工不能、孔壁崩壊
- ② 地中障害物、特に転石・玉石等の把握不十分：杭体不良、損傷および施工不能、孔壁崩壊
- ③ 埋込み杭・場所打ち杭における杭工法の選定ミス：施工不能、孔壁崩壊、地盤・構造物の変状
- ④ 打込み杭（既製コンクリート杭）における杭種の選定ミス：杭体損傷

一方、杭基礎の設計が標準貫入試験による N 値に頼り過ぎることも、トラブル要因の一つに挙げられよう。前講座において指摘したように、例えば載荷試験結果は、日本建築学会編「建築基礎構造設計指針」⁴⁾の極限先端支持力算定式による算定値に対して、埋込み杭では約32%、場所打ち杭では約39%が下回る可能性がある。これは一例であって、 N 値万能で設計が行われていることの功罪については改めて記述しないが、杭基礎トラブル集⁵⁾でも、「標準貫入試験と杭基礎のトラブル」と題した項において N 値万能の功罪が指摘されている。杭基礎の設計を行う時には、これらの指摘事項を再確認することを薦めたい。

表—2.1 計画・設計の詳細事項とそれに起因するトラブルの種類（杭基礎トラブル集³⁾から引用）

			杭体不良，損傷	施工不能 孔壁崩壊 鉄筋共上がり			地盤・構造物 の変状，杭体 浮上がり			不同沈下，支 持力不足			傾斜，偏心			騒音，振動			
				打	埋	場	打	埋	場	打	埋	場	打	埋	場	打	埋	場	
杭基礎構造の計画	設計条件の把握	建築条件																	
		地盤条件	○	△		◎	○	◎				○	○			△			
		地下水状況				△	△	△					△						
		地中障害物	◎	○		△	◎	△		△				△					
		敷地条件																	
		近接施工							◎										
		施工環境								△									
		工期・工費																	
	支持層の選定	○			◎						○	△	△						
	杭工法の選定		△	△		○	◎	◎	△								※	△	
枕種の選定	◎	△																	
杭基礎の設計	鉛直支持力設定																		
	NFの検討							△			△								
	水平耐力の検討																		
	杭配置の決定																		
	断面算定																		
	詳細設計				△														
施工仕様の作成				△															

注1) 打:打込み杭，埋:埋込み杭，場:場所打ち杭

2) アンケート調査による発生頻度

◎：特に発生頻度が多いトラブル アンケート中 10件以上

○：発生頻度が多いトラブル アンケート中 5から9件以上

△：発生報告のあったトラブル アンケート中 5件未満

※：アンケートでは報告されなかったが発生が予想されるトラブル

2.2 施工中のトラブル要因とそのトラブル事例

トラブルを生じさせる要因が施工中にあるものとしては、図—2.1に示したように、地盤特性に対する知識不足、施工機械の選定誤り、施工管理の誤り、施工機械の操作の誤り、などが挙げられる。これらの要因は、現場を管理する技術者あるいは施工機械を操作する技術者の知識や経験の不足によるところが多い。

施工中のトラブルとその要因としては、施工法ごとに特有のことが多い。杭基礎トラブル集⁶⁾では、施工法ごとに代表的なトラブルの種類およびその要因をまとめた、表—2.2を示している。この表において、施工不能、能率低下（高止まりを含む）、傾斜・偏心、地盤・構造物の変状などは、これらのトラブルが発生した時点で、その対処策を講じることができる。しかし、杭体不良（場所打ち杭のサクシオン等による先端地盤の緩みを含む）や損傷は、施工時に気付く場合もあるが、見過ごされる可能性のあるトラブルである。また支持力不足は、載荷試験などの特別な品質管理で見出すことができる。しかし、これらを見出せた場合はトラブルとなるが、見逃した場合には建設後の供用時に上部構造の不同沈下などを生じさせる要因となる可能性がある。これらの施工後に発生するトラブルとその要因に関する詳細については、次項で述べる。

一方、公害に関しては、杭の施工に直接関係する規制法として、騒音規制法、振動規制法および廃棄物の処理及び清掃に関する法律などがあり、規制されている。したがって、表—2.2において「アンケートにみられなかったトラブル」と記されているように、これらの規制法に従う限り、公害に関するトラブルは発生していないこ

とになる。

2.3 施工後のトラブル要因とそのトラブル事例

杭基礎トラブル集⁷⁾によれば、供用時のトラブル事例の報告は少ないが、トラブルが起きる理由として、以下の事項が示されている。

- ① 設計の前提条件が実際と異なる。
- ② 不可抗力的な条件に遭遇する。
- ③ 施工時に気付かないまま見過ごされた不具合がある。
- ④ 設計段階である現象を予見していたが、準備した対応策が適切に機能しない。
- ⑤ 供用時に設計条件と異なる使われ方をする。
- ⑥ 設計時に計算の誤りや判断の誤りがある。

また、これらの理由と杭施工後の建設物供用時におけるトラブルの種類および具体的な要因をまとめた表—2.3が、杭基礎トラブル集⁷⁾に示されている。

前述したように、施工中に発生していたが見過ごされていた不具合（杭体不良・損傷、あるいは先端地盤の緩みなど）は、供用時の支持力不足・不同沈下などの要因にもなる。しかし、施工中ばかりでなく施工後の供用時にもトラブルを生じさせる要因が存在していることが、上記の理由および表—2.3から読みとれる。また、供用時のトラブルがさらに他のトラブル要因になる可能性もある。例えば、同表中の地盤沈下に伴う杭頭部の突出は、地震時に上部構造からの慣性力による杭頭水平力が杭体に損傷をもたらすなど、二次的なトラブルの発生要因になる可能性がある。

表-2.2 工法ごとの代表的なトラブルとその要因（杭基礎トラブル集⁴⁾から引用）

工法 トラブルの種類	打込み杭	埋込み杭	場所打ち杭
杭体不良, 損傷	・ハンマー, 杭種の選定の誤り ・地中障害物の存在	・施工機械の不備	・生コン車の遅滞 ・機械の故障, 不良
施工不能, 能率低下 (高止まりを含む)	・地層判定の誤り	・孔壁安定管理 ・地中障害物の存在	・地層判定の誤り ・近接施工による孔壁崩壊
支持力不足, 不同沈下	・NF評価の誤り ・地層判定の誤り	・地層判定の誤り ・杭設置時, 根固め時の施工管理不備	・サクシオン等による地盤の緩み ・地層判定の誤り
傾斜・偏心	・地中障害物の存在	・地層判定の誤り ・杭設置時, 根固め時の施工管理不備	・地中障害物の存在 ・過度な掘削速度
地盤・構造物の変状	・地盤の側方移動あるいは浮上り	・孔壁の安定管理	(・孔壁の安定管理)
公害	(・杭打ちの騒音・振動)	(・掘削土砂, 廃泥水の処理)	(・掘削土砂, 廃泥水の処理)

() 内は, 今回のアンケートにみられなかった一般的なトラブルの要因

表-2.3 供用時のトラブルの要因（杭基礎トラブル集⁷⁾から引用）

トラブルの種類 トラブルの理由	杭体不良・損傷	支持力不足・不同沈下
設計の前提条件が実際と異なる	—	・地盤構成が異なる ・近接した大規模工事
不可抗力な条件に遭遇	・液状化等による地盤の大変状 ・予測以上の洗掘	—
施工時に見過ごされた不具合	・スライム, 孔壁管理, 孔曲がり等	・先端地盤の緩み
予見した現象への対応策が不適切	・地盤沈下に伴う杭頭部の突出	・ジャッキアップ機構の機能が不十分

3. 工法別による杭基礎のトラブルとその対策

前述したトラブル事例のうち, 支持力不足や傾斜・偏心などの数例は, 各施工法に共通するトラブルであるが, ほとんどの事例は, 各工法特有のトラブルと判断できる。したがって, 本章では各施工法に絞って, 重要と思われるトラブル事例とその対策法について, 以下の各節で記述することとする。

3.1 打込み杭工法におけるトラブルとその対策

打込み杭工法の長所は, 他の工法に比べて施工装置が大掛かりでないこと, 比較的狭い敷地での施工が可能であること, 地盤を締固めながら打設されるために一般に大きな支持力が期待できること, 最終止め時のラム落下高さ, 1打あたりの貫入量やリバウンド量などにに基づき支持力の施工管理ができること, などが挙げられる。

一方, 打込み杭の短所, すなわちトラブルを発生させる要因となる事項としては, 以下のような事項がある。

- ① 杭打ち施工に伴う騒音や振動などの公害が大きい。
- ② 打撃力が大き過ぎたり, 偏心打撃を加えたりすると, 既製コンクリート杭では断面破損 (図-2.2(a), (b)参照) や鋼管杭では杭頭に提灯状の局部座屈 (図-2.2(c)参照) をおこすおそれがある。
- ③ 既製コンクリート杭では, 軟弱層を貫通するとき杭に生じる引張り応力によって引張り破壊を起こすおそれがある (図-2.2(d)参照)。

これらのトラブルに対する対策として, ①については,

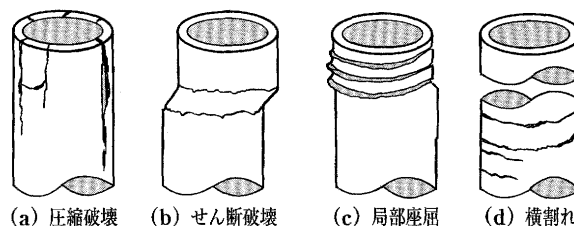


図-2.2 打込み施工中の杭の損傷

騒音・振動に関する規制法により市街地などで規制を受ける場合は, 他の騒音・振動低減工法 (埋込み杭, あるいは場所打ち杭工法など) に変更せざるを得ない。また, ②のトラブルに対しては, 打込みに先立って適切な計算式を用いて発生する打撃応力を求め, 杭材の安全性を確かめておく必要がある。そして, 杭・キャップ・ハンマの軸心間のずれなどによる偏心打撃が局部的に高応力を発生させることになるので, 既製コンクリート杭においてはコンクリートの設計基準強度の70%程度, あるいは鋼管杭においては鋼材の降伏強度の70%程度を打撃に対する許容応力と考えると, それ以内に上記の打撃応力の算定値を収めるようにすることも対策法の一つである。また, 鋼管杭の場合に発生する杭頭局部座屈に対しては, 補強バンド (厚さ6~12 mm, 幅200~300 mm) を杭頭に取り付けるのも有効である。さらに, ③に関しては計算で求めるのが難しいので, 既製コンクリート杭の場合, 軟弱層を貫通する時には, ハンマの落下高さを小さくして軽打するような配慮が必要である。

3.2 埋込み杭工法におけるトラブルとその対策

埋込み杭工法の特徴は、騒音や振動の程度が打込み杭に比べて大幅に低減され、市街地においても既製杭の使用を可能とした点である。

しかし前講座でも記したように、数多く開発され供用されている埋込み杭工法におけるトラブルの要因となるものとしては、以下の事項がある。

- ① 掘削作業が主であるため地盤を緩めることによって孔壁崩壊や支持力低下を生じやすい。
- ② 打込み杭に比べて施工管理が難しい。
- ③ 掘削機や掘削方法のいかんによっては場所打ちコンクリート杭と同様の問題点が存在している。

これらのうち、③に関する詳細については、次節を参照されたい。

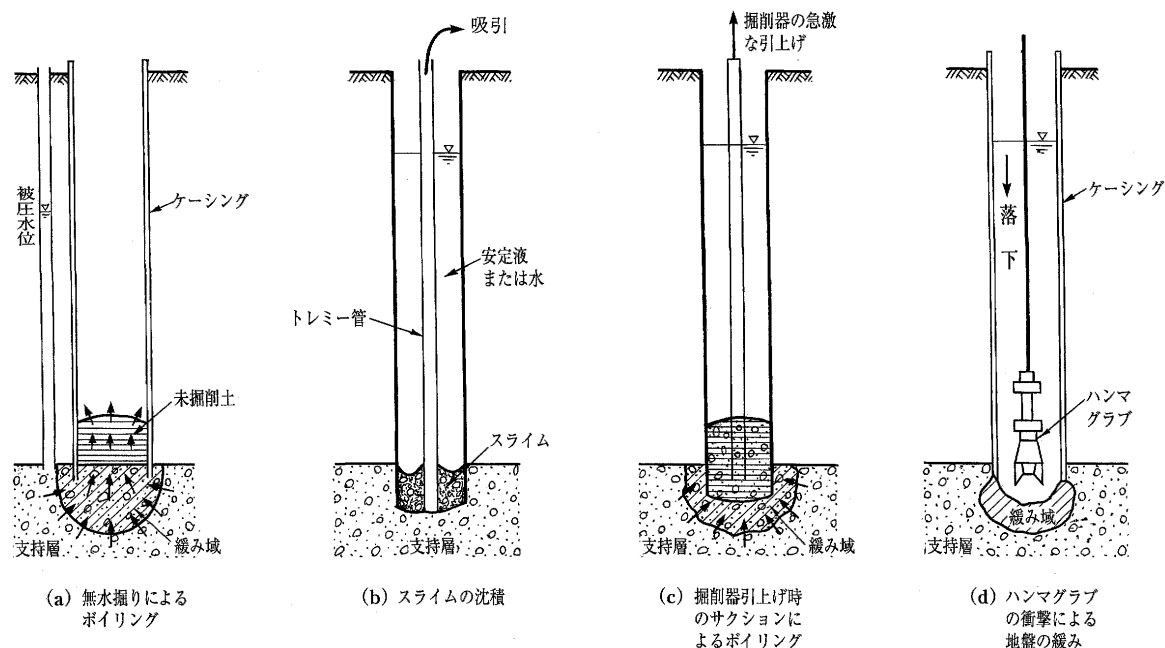
3.3 場所打ち杭工法におけるトラブルとその対策

場所打ちコンクリート杭の長所としては、騒音や振動の程度が低いこと、大口径杭の施工が可能であることなどが挙げられる。しかし、以下のようなトラブルの要因となる短所を有している。

- ① 工法の種類が多く、土質、地下水の状態、現場の施工上の条件、経済性などによって工法の適否が変わるので、工法選択には各工法の特徴をよく理解しておく必要がある。
- ② 地下水位が低く空掘りできる場合、地層によっては孔内が酸素欠乏状態、あるいはメタンガスの発生などがあるので注意する。特に深礎工法において、孔底に人が入って作業する場合には、十分な管理を要する。
- ③ 掘削が支持層へ到達したことを十分確かめ、かつ支持層への必要根入れ深さ（通常1m以上）を確保する。さらに、支持力確保のために、掘削終了時には底面をできるだけ丁寧に仕上げる必要がある。

ある。

- ④ 一般に、掘削することによって杭周地盤を緩めるので、孔壁を部分的に崩壊させることがある。特に帯水層や伏流水のある砂層を貫通する場合、崩壊しやすいので注意を要する。
- ⑤ ベノト工法のように、ケーシングを用いて掘削する工法では、中間層が粘性土であると空掘りに近い状態で掘り進む。この場合、砂質土の支持層に被圧水が存在すると、掘削孔下部の土被り圧がこの被圧水の水圧に耐えられなくなって、被圧水が孔底から噴出するに至る（図—2.3(a)参照）。このような事態になると、掘削孔下部の支持層内部は透水圧のため、ボイリングを生じて攪乱状態となる。ボイリングが収まった後も、この部分の相対密度は大幅に低減しており、杭の先端抵抗はほとんど期待できない状態になっている。
- ⑥ 安定液（または清水）を満たして掘削する工法の場合、掘削が終了してからコンクリートを打設するまでの間に、液中に浮遊していた土粒子がスライムとなって孔底にたまる（図—2.3(b)参照）。安定液が劣化している場合には、図—2.4に示すように1時間にスライムの沈積高さが2mに達したという観測記録もある。スライムの大半は、細砂ないし中粒砂であって、非常に緩い状態で沈積しているため、この上にコンクリートを打設しても先端支持力はほとんど期待できない。
- ⑦ 掘削器で孔底の土を掘った後、掘削器を急激に引上げると、掘削器下面が真空状態に近くなるため、吸引力が生ずる。その程度は、地盤との密接度の高い掘削器ほど、そして引上げ速度が速いほど著しくなる。したがって、孔底が軟弱粘土層の中にある場合には、粘性土が回りこんで孔底が盛上るといった



図—2.3 場所打ちコンクリート杭先端部の施工上の問題点（文献8）に加筆）

初級講座

現象が起り、また滞水した支持層内ではボイルングをひき起こして先端地盤をゆるめてしまう(図—2.3(c)参照)。

- ⑧ オールケーシング工法の場合、ハンマグラブの衝撃掘削による先端支持地盤の乱れを考えねばならない(図—2.3(d)参照)。一般にはあまり考慮されていないが、孔底の緩み域の深さは約0.8 mであったという報告(例えば、文献9))もある。

以上のトラブルに対する対策として、⑤に関しては、掘削途中でケーシング内へ注水して被圧水頭以上に孔内の水頭を保ちつつ、水中掘削するといった方法が考えられる。また、⑥に対しては、安定液の管理を入念に行なって劣化した安定液は新しいものと取りかえること、およびスライムの除去を確実に行うことなどである。スライムの除去は、掘削完了後のみでなく、コンクリート打設の直前にもトレミー管を利用して行う必要がある(図—2.3(b)参照)。そして、⑦に関しては、掘削器の引上げを慎重にすることが最良の対策である。さらに、⑧に対しては、緩み域の土砂を取り除くか締固めること、かつ孔底を平らに仕上げるのが、施工上の対策として必要である。

4. 施工後の供用時に発生したトラブル事例

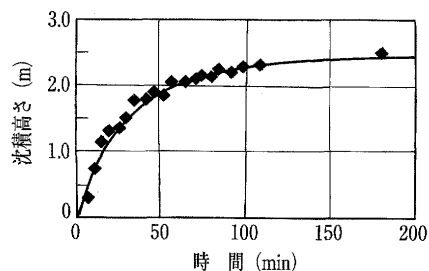
杭基礎施工後の建設物供用時に発生するトラブルは、前述したように上部構造に被害が及ぶので、最も避けなければならないトラブルである。本章では、建築物の供用時に地盤沈下および地震時液状化により杭基礎が破壊し、そのトラブルによって建築物そのものを建て替えるまでに至った事例を紹介する。また、それに対する対策法を示す。

4.1 地盤沈下によるトラブル事例

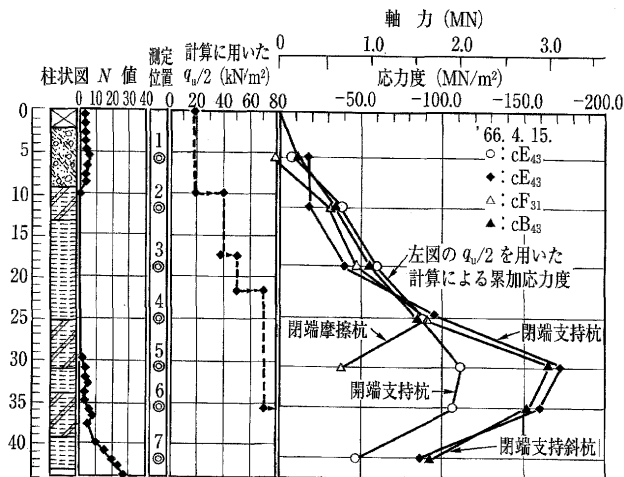
建設物竣工時には、杭基礎は杭先端抵抗力と杭周面抵抗力で上部構造を支持している。この時の杭周面抵抗力は、杭が地盤から下方へ沈下するに抵抗する上向きの摩擦力である。しかし、その後に杭の沈下より大きな地盤沈下が生じた場合、それまで上部構造を支持していた上向きの摩擦力が、下向きの摩擦力となる。このような摩擦力を負の摩擦力(ネガティブフリクション)と呼称し、またNFと略称することもある。

負の摩擦力により生じる杭の軸力について、文献10)で報告されている測定結果を、図—2.5に示す。この実測地点の地盤は、地表面から約40 mまで沖積層で、この層の年間沈下量は約80 mmである。試験杭は、 $\phi 609.6$ mm、肉厚9.5 mmの鋼管杭であって、杭頭荷重は作用していない。同図に示した測定値は、杭の打込み後1年10ヶ月経過時のものである。この図から、支持杭と摩擦杭および杭先端の開端と閉端との違いによって軸力分布値は異なるが、その最大値は約3.1 MNを示し、かつ杭先端の最大荷重度は約90 MN/m²にも達することが読み取れる。

上述したように地盤沈下による負の摩擦力は、もはや上部構造を支持する抵抗力ではなく、上部構造からの鉛



図—2.4 スライムの沈下高さ～時間関係(文献8)から引用)

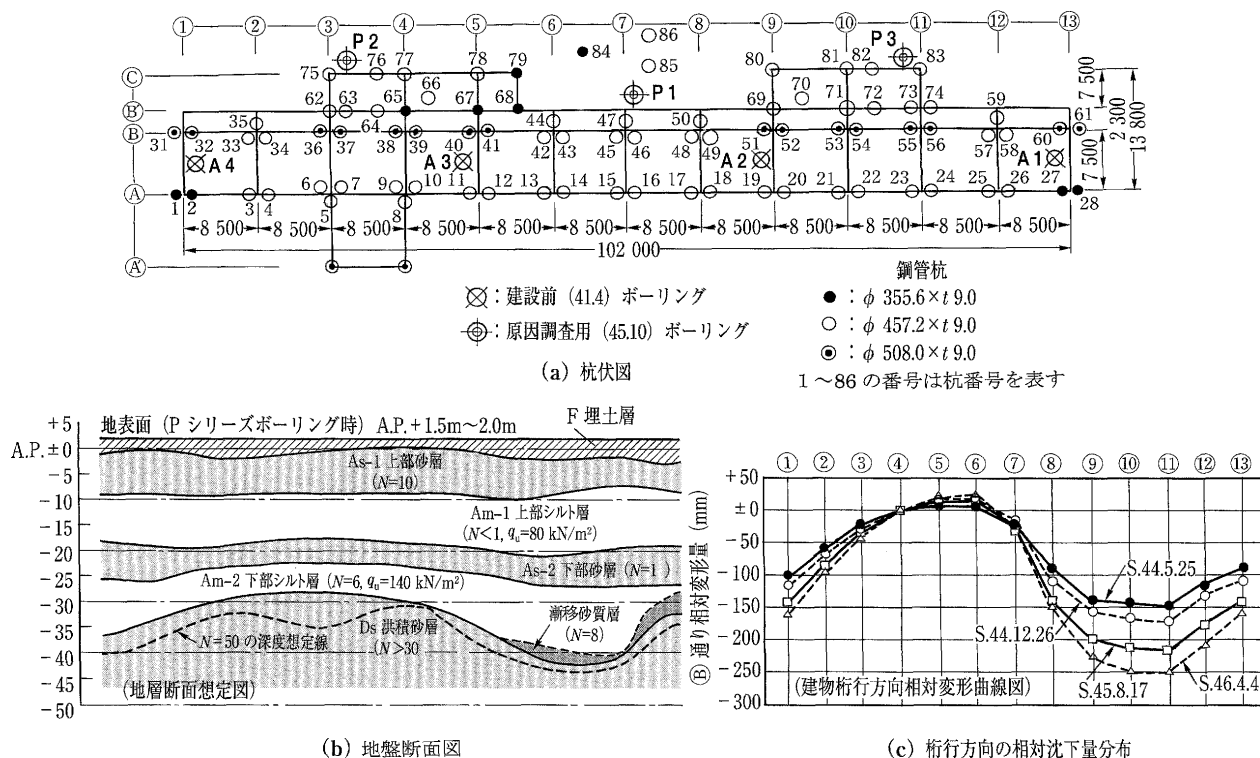


図—2.5 地盤沈下地帯における負の摩擦力の実測例(文献10)から引用し、SI単位に修正)

直荷重に荷担する力になる。したがって地盤情報の誤認などにより、設計段階で負の摩擦力が発生することに気付かずに対策を講じなかった場合には、杭体破損や支持力不足などにより、上部構造に不同沈下のトラブルを発生させる。このような実例として、文献11)で紹介されている、井上による鉄筋コンクリート造3階建学校建築の不同沈下の実測結果¹²⁾を、引用して以下に示す。

図—2.6(a)の杭伏図に示した寸法の鋼管杭が、同図(b)の地盤断面図に示す地盤内に長さ30~40 mわたって打ち込まれている。この地盤は地下水の汲み上げと約2 mの盛土によって年間約12~16 cmの沈下を生じていたが、建物は竣工後に不同沈下が目立ち始め、4年間で最大25 cmにおよぶ相対沈下量となった。壁面のひび割れや開口部の変形などが著しく、機能上の支障が生じたため、ついに建物は取り壊されるに至った。同図(b)の地盤断面および(c)の建物の相対変位量から、圧密層の底面に10数mの高低差があり、相対変形量の分布形状が支持層の起伏に比例していることがわかる。この不同沈下は、杭群に作用する負の摩擦力の圧密層に比例した大きな変化、および杭基礎の設計における負の摩擦力に対する無対策などが、原因として挙げられる。

このような負の摩擦力に対する対策としては、負の摩擦力が生じてても良いように十分な杭体耐力と先端支持力を確保する方法、および地盤沈下が生じないように地盤改良を施す方法などがある。また図—2.5からも分かるように、先端支持杭において大きな負の摩擦力が発生す



図—2.6 負の摩擦力による鉄筋コンクリート造3階建学校建築の不同沈下の事例¹²⁾ (文献11)から引用)

るので、地盤沈下に追従して沈下する摩擦杭を採用することも対策法の一つである。さらに、速い動きに大きな抵抗、そして緩慢な動きに小さな抵抗を示す粘弾性体のアスファルトを表面に塗布した、負の摩擦力低減杭 (SL 杭と呼称) を用いることも有効である。

4.2 地震時液状化によるトラブル事例

緩く堆積した飽和砂は、地震時に液状化する可能性が大きい。地震により、地盤はせん断変形するが、それに伴って地盤内の間隙水圧が上昇 (過剰間隙水圧の発生) するため、土粒子間の圧縮力やせん断力として伝達される応力 (有効応力) が減少する。この有効応力がほとんど零 (地盤のせん断抵抗が消滅) になった状態が、液状化現象である。このような液状化が上部構造を支持している杭周辺地盤に生じると、その部分の水平地盤反力および杭周面摩擦力などの抵抗力は、ほとんど零となる。したがって液状化が生じた場合、その対策を講じていない杭基礎は損傷を受けることになる。本節では、文献13)で報告されている、1995兵庫県南部地震時に液状化により杭基礎が損傷し、上部構造が傾斜した事例を紹介する。

対象の建物は、芦屋市臨海部に位置し、地上11階、地下無の4棟からなる共同住宅である。地震により、これら4棟のうちの1棟が海側に大きく傾斜した被害を受けた。この建物の基礎構造は、独立フーチングの杭基礎であって、杭は埋込み工法によるPC杭 (図—2.7 (a), (b)参照) である。また、この建物の敷地は、南側が海、東・西側が川で囲まれ、3方とも護岸で仕切られている。その地盤構成は、GL-8 m までが砂礫を主体とする埋土層、GL-8 ~ -16 m が N 値2~40の沖積砂礫層、その下層厚2 m に N 値10以下の沖積粘土層、

そして層厚約6 m に N 値30~50の薄い粘土と沖積砂質土の互層があり、GL-24 m 以深が N 値40以上の洪積砂質土層となっている (図—2.7 (c)参照)。なお、地下水位はGL-3.5 m 付近にある。

文献13)によれば、水中テレビカメラなどを用いて建物を支持している杭孔内の状態を詳しく調査した結果、図—2.7 (c)のような被害状態になっていた。その原因は、埋土層の液状化による海側護岸背後地盤の側方流動および地盤反力低下の相乗効果にあったと結論されている。すなわち、護岸に近いほど側方流動の影響を大きく受け、杭体がくの字に折れ曲がっている南側からひび割れ程度に収まっている北側へと、杭基礎の損傷程度が異なったために不同沈下し、上部構造が大きく傾いたものと考えられる。

このような液状化に伴う杭基礎のトラブルを回避する対策としては、杭周辺地盤の液状化によって杭体が破壊しないような靱性に富む鋼管杭、SC杭、あるいは鋼管巻き場所打ちコンクリート杭などを採用するのが有効である。ただし、これらの杭基礎を採用しても液状化の被害から回避できない場合は、液状化を生じさせないように液状化層を地盤改良せざるをえない。なお、本事例のような護岸の移動による側方流動に対しては、敷地周辺を鋼矢板などで補強して、その影響を敷地内に及ばないようにする対策法などが考えられる。

5. ま と め

前講座では、主に我が国で実用に供されている杭種および施工法を紹介し、それらの施工法および鉛直支持力に関する設計法について、解説を加えた。そして本講座では、杭基礎で発生する一般的なトラブルとその要因と

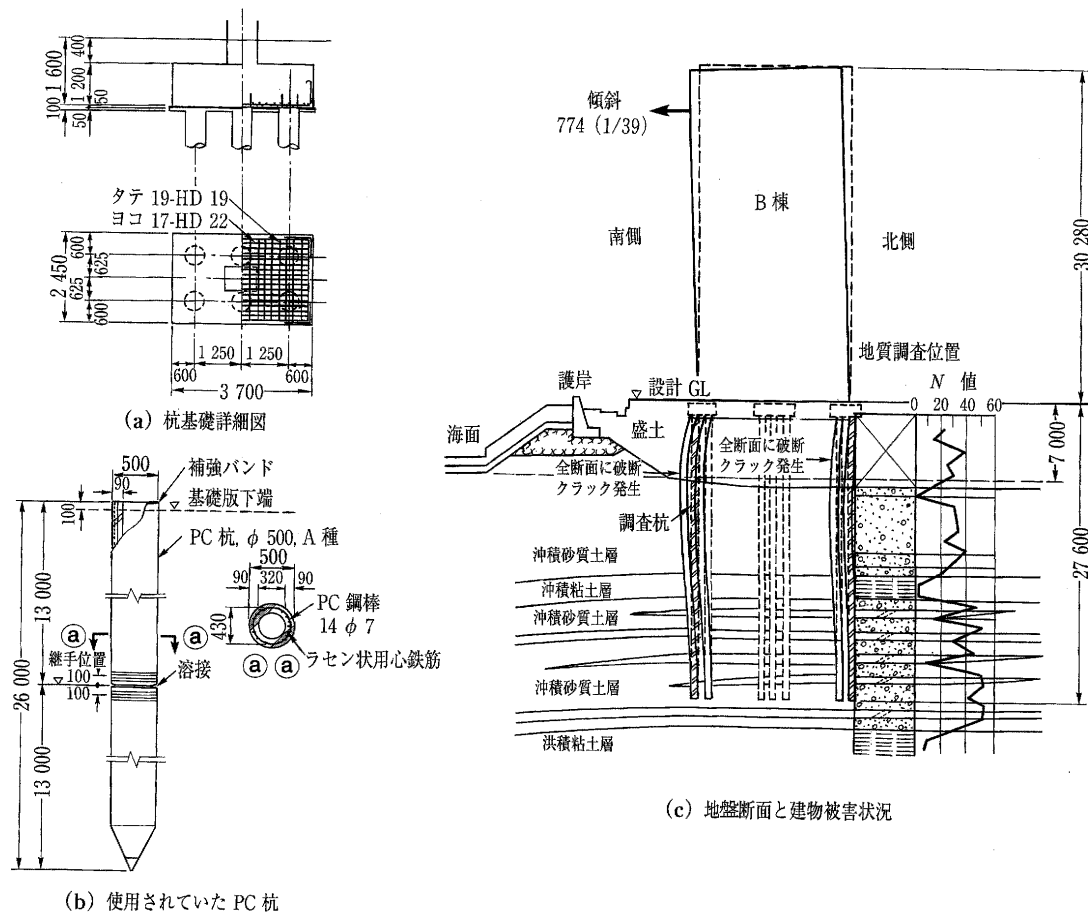


図-2.7 地震時液状化による側方流動で杭基礎が被害を受けた事例（文献13）を引用・加筆）

の関係、さらにこれらのトラブルに対する基本的な回避の方法、あるいは対策の方法について紹介した。最後に、最も避けなければならない建設物施工後の供用時に生じた地盤沈下および地震時液状化により建物を解体し、再建築するに至ったトラブル事例を紹介し、解説を加えた。

予想を超える外力や自然現象による場合を除いて、トラブルの発生要因のほとんどは、設計あるいは施工時の人為的ミスと技術的未熟（知識や経験不足）によるものである。したがって、トラブルを回避する最良の方法は、これらの仕事に携わる技術者各人が人為的ミスを少なくする工夫と技術力を磨くことにありと結論できる。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：トラブルと対策シリーズ① 杭基礎のトラブルとその対策，第6刷発行，2006。
- 2) 地盤工学会編：トラブルと対策シリーズ① 杭基礎のトラブルとその対策，第6刷発行，pp. 3～4，2006。
- 3) 地盤工学会編：トラブルと対策シリーズ① 杭基礎のトラブルとその対策，第6刷発行，pp. 8～10，2006。
- 4) 日本建築学会編：建築基礎構造設計指針，pp. 207～

212，2001。

- 5) 地盤工学会編：トラブルと対策シリーズ① 杭基礎のトラブルとその対策，第6刷発行，pp. 7～8，2006。
- 6) 地盤工学会編：トラブルと対策シリーズ① 杭基礎のトラブルとその対策，第6刷発行，pp. 15～16，2006。
- 7) 地盤工学会編：トラブルと対策シリーズ① 杭基礎のトラブルとその対策，第6刷発行，pp. 16～17，2006。
- 8) 山肩邦男・永井典史郎・富永晃司・伊藤淳志：新版 建築基礎工学，朝倉書店，p. 135，2004。
- 9) 林 一隆・吉川正昭・国重敏明：BENOKU30による大口径杭の原位置試験，奥村組技術年報，No. 1，pp. 83～96，1975。
- 10) 遠藤正明：ネガティブフリクション（鋼グイー鋼グイ研究委員会報告），土質工学会，pp. 257～315，1969。
- 11) 山肩邦男：朝倉建築工学講座6—建築基礎工学，朝倉書店，pp. 203～204，1981。
- 12) 井上嘉信：ネガティブフリクションによる建物の不同沈下と設計・施工上の注意，コンクリートパイル，No. 9，1973。
- 13) 中澤明夫・難波伸介・蘇鉄盛史・時松孝次・大岡 弘・社本康弘・中澤瑤子：兵庫県南部地震で大きく傾斜した高層建物の杭基礎の被害調査，日本建築学会構造系論文集，第520号，pp. 69～76，1999。