

2019 基礎指針へその 1 : 杭の水平抵抗解析における杭先端境界条件

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

2018 建築学会大会 9 月 5 日に行われた基礎構造 PD では「杭基礎に性能評価型耐震設計法を適用する場合の問題点と将来展望」と題されて来年中に改定される予定の建築基礎構造設計指針（「2019 基礎指針」と略記）の耐震関係の全体像が垣間見られる議論がなされた。それを聴きながら筆者の心の中に浮かんだいくつかの感想があるので、思いつくまま記してみたい。

まず、最初にその 1 として田村解説（「田村修次：新基礎指針における大地震に対する杭の耐震設計法の概要」）で具体的な解析法に関して「あれ！」と驚かされたことがあったので、その点について取り上げてみたい。杭の応力を評価する上での推奨モデルとして図 3 が示されており、杭先端の境界条件は水平ローラーとされている点である。

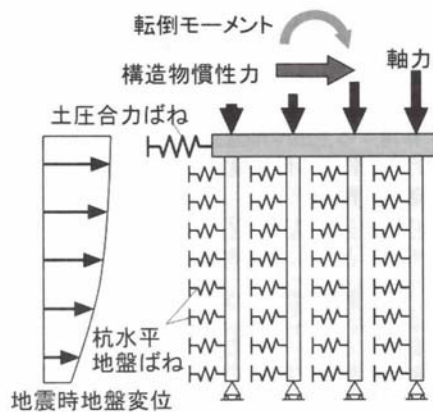


図 3 地盤変位を考慮した群杭フレームモデルの杭応力評価モデル

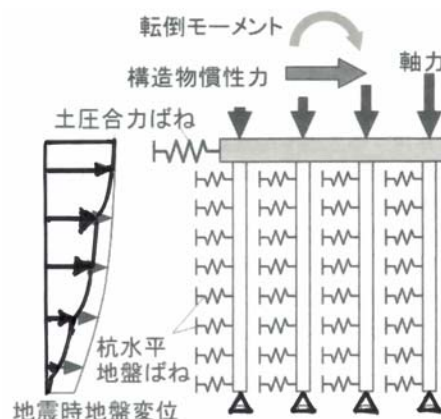


図 3' 地盤変位を考慮した群杭フレームモデルの杭応力評価モデル

なぜ、この境界条件が選ばれたのか、については詳しい説明がなく、口頭では「先端をピンとすると水平力を負担してしまう」との奇妙な意味不明の発言があるだけであった（該当する文章部分を読んでも同様に不明瞭な説明があるだけで中味がよく読み取れない）。応答変位法の適用にあたっては、どのような地盤の応答モードを設定するかが決定的な要因となるが、それに関する言及が不十分であり、「杭先端で相対変位がゼロであることも考慮し、杭先端の境界条件は水平ローラーとした」とのこれまた奇妙な文章が添えられているだけであるので、ローラーとした意図やその理由については結局参考となる情報が得られないという結果となった。

そこでフロアから次のような質問をしたのである。

“実際の状況を想像すると、地震動は当然のことながら工学的基盤よりずっと深い所から伝わって来るのであり、その [工学的基盤] 上端境界では直上の地層の剛性との関係でイン

ピーダンス比が極端に変化するケースが多い。一方、支持杭は工学的基盤を支持層とし、その根入れも深く取ることが多いのも事実であって、そこで杭の応力が過大になる恐れがある。その状況が解析モデルでも表現される必要があるのに、杭先端を水平ローラーにしてしまっただけでは水平せん断力のやりとりなしを最初から決め打ちすることになってうまくないのではないか？ そのあたりが不明瞭な説明であったので、何故水平ローラーなのかについて明瞭に解説して欲しい。”〔そればかりではない。ローラーでは、どこかにストッパーを付けておかないとどこまでも勝手に動いて行ってしまわないか、との不安定構造になってしまう根本的な問題もあるが、さすがにそこまでは発言しなかったことを付け加えておきたい。〕

回答は、やはり不鮮明で自己矛盾ではないかとさえ思われる内容に終始したので議論は噛み合わず（司会者からの指摘もあった）途中で諦めてしまったが、“杭先端の状況は誰も分からず想像するより仕方がないのであって、当面は可能な限りで杭先端の実状を模擬した模型実験で様子を見るとか、被害調査の時に杭を掘り出して先端を観察するとかの情報を積み重ねるべきだとの内容を書くことこそが Recommendations である基礎指針には相応しいのではないか？”とのコメントを追加することで発言を終わったのである。

帰宅後、以上のことが気になったので資料を調べ直してみると、パネリストは以下の内容を言いたかったのではないかと、との類推に行き着くことが出来た。

“図3では杭先端位置でも地盤変位が生じており、そのモードを強制変位（すなわち荷重項）として与えたために「先端をピンとすると水平力を負担してしまう」とか、「杭先端で相対変位がゼロであることも考慮し、…」などの奇妙な表現としてか言えない内容に結びつくことになったのではないか？”

この類推から、ローラーという不可解な境界条件がその場しのぎとして無理矢理に適用され、言い換えれば、寧ろ姑息な手段として選ばれたのであろうと推定できたのである。それによって、もやもやとしていた不鮮明さが少し晴れることになったが、“どうしてこのような地盤の応答モードを用いたのか？ 与える地盤変位の形状が適切ではなかったということではないか？”が問題として残ることになった。その答えは次のように意外に簡単である。

“図3で杭先端位置でも地盤の変位が生じている形を選んだところに無理があったのであり、杭先端位置では相対変位がゼロであるように修正すればよい。すなわち、地盤の応答モードは SHAKE などのソフトで求められるものを用いるのが普通であるが、得られた応答モードの杭先端位置を基準（すなわちゼロ）としてそれ以浅のモードを杭の姿図と重ねて設定すればよいのである。”

このような観点から、図3'には実際を連想させるいくつかの層境界でインピーダンス比が変化することで不連続点となる地盤の応答モードと、杭先端をピンと仮定した場合の組み合わせを太線で書き直したものを示す。このうち、杭先端直上の不連続点が工学的基盤上面を示すことで上記した杭の応力が過大になる場合も評価出来ることになる（パネリスト自身が「杭先端で相対変位がゼロであることも考慮し」と書いているわけであるから、相対変位に関する地盤変位形状だけを強制変位（荷重項）として与え直して解析を行うなど、再検討していただきたいものである）。

杭先端はピンだけでなく固定とする場合も考えられ、施工性との関連で支持層へ根入れされた杭先端が回転に対してどの程度の拘束条件となるのかを極めることでピンとするか固定とするかを決定する必要がある。したがって、杭先端の状況が明らかになるまでは、両者のケースとも解析して結果を比較するなどを繰り返すことも必要となろう。その積み重ねで杭先端の挙動が明らかになれば、回転ばねを付けて曲げモーメントに対しての固定度を導入することによって杭先端付近の曲げ応力もより精度高く求められることが期待出来る。さらに、鉛直ばねや水平ばねを付けることにより杭先端の沈下や水平移動の影響の導入も出来て、杭先端付近の応力状態が一層現実的で明確に表現される時代が来るかも知れない。

少なくとも杭先端水平ローラーの仮定が実態を表していない（あり得ない境界条件とも言える）ことは誰もが思うことと想像され、それよりもピンや固定仮定の方がより現実的であり、回転ばねなどによる固定度の導入がさらに実状をより正確に表出できることは間違いのないと言えるであろう。

応答変位法を適用する場合には地盤の応答モードの設定がとくに重要であることはすでに述べたが、たまたま翌日に行われた振動 PD「震災の教訓を如何に地震動・地盤・基礎の研究に活かすか」で柏解説（「柏尚稔：杭基礎の地震被害に関する研究動向」）を聴く機会があったのは筆者にとって幸運であった。そこでも応答変位法に触れられており、地盤の応答モードを求めるにあたっての動的効果としての減衰をどのように導入するかが如何に重要であるかを再認識したことが述べられていたからである。地盤各層のインピーダンス比が応答モードの形状を決める重要な要因になるのに対して、減衰効果は応答モードの大きさ（レベル）を決める決定的な要因となるからである。柏解説では上記減衰など未解明な要因に対して真摯に対応しようとする姿勢が見られ（減衰効果の重要性に言及している点などがそれに当たる）、それに対して田村解説は未解明の要因も含めて説明不足であるのに断定的な表現が目立ち（地盤の応答モードと杭先端ローラーに対する記述などがそれに当たる）際だって対照的な関係となっており、**Recommendations** である基礎指針では当然ながら前者の視点・立ち位置から書かれるべきであろうと考えさせられる大会であった。2019 基礎指針は是非そのようなものとなることを心から願う。

注1：「2019 基礎指針へ」と題して以下「いしずえ通信」に何回か連載する予定である。

注2：基礎 PD、振動 PD は以下の資料に基づいて行われたので、それぞれ参照いただければ幸いである。

構造部門（基礎構造）パネルディスカッション資料、杭基礎に性能評価型耐震設計法を適用する場合の問題点と将来展望、日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会、69p.、2018.9

構造部門（振動）パネルディスカッション資料、震災の教訓を如何に地震動・地盤・基礎の研究に活かすか、日本建築学会構造委員会振動運営委員会、78p.、2018.9