

2019 基礎指針へ—その 2: 杭先端境界条件への追記

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

いしずえ通信 28 号で書いた内容について、その後パネリストの田村博士と連絡することが出来、いくつかのディスカッションを通じて判明したことがあるので、それについて 2019 基礎指針へ—その 2 としてまとめておきたい。応答変位法の適用における杭先端境界条件を設定する上での一応の解決を得たからである。

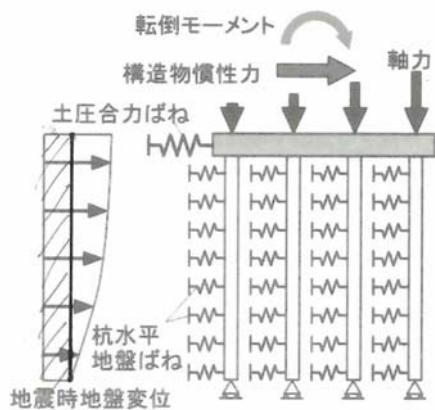


図 3 地盤変位を考慮した群杭フレームモデルの杭応力評価モデル

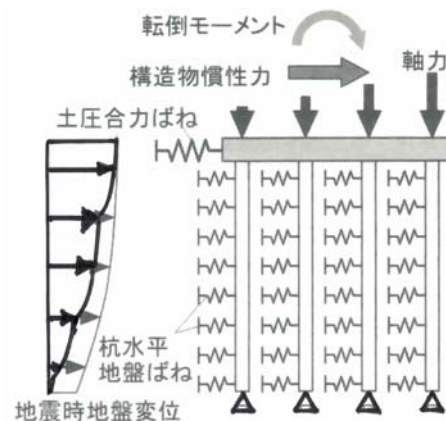


図 3' 地盤変位を考慮した群杭フレームモデルの杭応力評価モデル

説明のために、図 3 で地盤変位のうち杭先端位置より深い地層の応答成分（斜線を施した部分）と杭先端より浅い相対変形成分に分離したものを示し、合わせてその 1 で用いた図 3' の再掲図を比較してみる。

結論から言えば、以下のようなことが判明したのである。

1) 図 3 で斜線を施した部分、すなわち杭先端より深い地層の応答成分は、杭への影響はない（少ない）と考えられるために、応答変位法の適用にあたっては除いて考えられるのが普通であって、それ以浅の相対変形にあたる部分のみを杭への強制変位として与えて解析すればよいことになる。図 3' はそのような考えで実際にあり得る各層境界でのインピーダンス比の変化を導入した相対変形にあたる部分を例示したものである（図 3 の斜線を施した部分を除いたものと解釈願いたい）。

2) 解析モデルとして考えれば上記の“杭先端より深い地層の応答成分を除く”とは“杭先端を水平ローラーと仮定する”ということに相当している。田村解説でローラーとしたのはこの部分のみに対してであると明言されていたれば明快であったのだが、残りの相対変形も含めての言及であったので、何を言っているのか、おかしいということになってしまったのである。

3) したがって、地盤変位分布を 2 つに別けて、杭先端より深い地層の応答成分に対しては杭先端ローラー、相対変形にあたる部分に対しては杭先端ピンなり固定なりの境界条件と

する、と明言されていれば何の疑問も生じることはなく、受け入れられる解説であった筈である。

以上の指摘をしたところ、そのとおりであり、見直して誤解のないようにしたいと思うとの回答を頂いて、一応の解決に至ったわけである。

筆者は有限長の杭の水平抵抗についての論文を書いたことがあるが〔杉村義広：杭頭回転拘束度および杭長を考慮した杭の水平抵抗理論解、日本建築学会構造系論文報告集、第65号、pp.132-143、1986.7〕、杭先端の境界条件は重要であるに拘わらず分からないことが多くて、今後、解明すべき課題であると書かざるを得ないことを経験した。また、建築学会のシンポジウム〔基礎構造運営委員会：杭基礎の耐震性に関する諸問題、2000.4や基礎構造運営委員会：杭基礎の耐震性に関する諸問題（その2）、2006.4〕などを通じて、橋梁を支持する鋼管杭の地震観測による先端の歪みが杭頭に劣らず大きくなる事例を発見し紹介したり、超高層建物を支持する杭基礎の地震応答解析に関する論文〔杉村義広、萩原康嘉、許斐信三、三町直志：建物-杭-地盤系の地震応答解析、その1～その3、建築学会大会、pp.1673-1678、1993.9〕で杭先端の杭応力が過大となる結果を得て、杭先端の重要性については心に留めることは多かったのである。それらについて詳しく書く機会があればその時に譲ることにし、ここでは3.11（2011年東日本大震災）で被害のあった学校の杭が引き抜かれた写真についてだけ述べてみたい〔三辻和弥、杉村義広：第4章地盤・基礎の被害、日本建築学会東北支部：2011東日本大震災災害調査報告、pp.38-43、2013.5に図4.16として示されている〕。



写真 4.16 新校舎の引き抜かれた杭先端部（撮影：三辻和弥博士）

地震後に筆者は大崎市古川地区の沖積平野に建つこの学校（RC造3階建て）の状況を見学したことがあるが、周辺地盤には液状化の痕跡が認められ、特別教室棟、普通教室棟（ともに1979竣工）が60cm程度以上と80cm程度以上、新校舎（1991竣工）が20cm程度以上沈下し、杭頭の損傷が認められると共にエキスパンションジョイントの段差が確認出来た。その後、基礎周辺の掘削調査が行われ、各棟の基礎1カ所ずつ、合計3カ所から杭も引き抜かれたそうで、たまたま見学していた三辻博士が撮影したものが写真4.16である。新校舎の杭は45cm径のPHC杭、下杭A種11m、上杭B種10m、したがって全長21m程度の杭が

表土、腐植土、砂、シルトなどの複雑な互層（地下9 m程度に一部 30 程度を示す中砂1 m ほどを挟むが全体を通じてN 値10 以下程度）を貫通してN 値50 以上の砂礫層に1 m程度 根入れされたもの（埋込み工法で最終打撃を加えた）と推定される。

杭先端がこれほどの損傷を受けるものかと驚かされる写真である。ほかの2本の杭（特別 教室棟、普通教室棟のPC 杭、下杭9~10m、上杭10~11m）は、損傷はあるもののこれほ ど酷いものでないか、あるいは被害らしきものは見られないかであるらしいので、この杭だ けがどうしてこのようになっているのか不思議さを感じさせ、慎重に扱うべきことを思わせ るものであるからか、記述を担当した三辻博士は、やや控えめに（というよりも地震被害だ けではないニュアンスを込めて）次のように述べている。“過大な変動軸力の作用など、地震 による被害の可能性も考えられるが、建物の建設年（1991年）から推定して、埋め込み工法 によって施工されたと考ええると、最終打撃時などに損傷した可能性も挙げられる。”

それに対して筆者は、この写真を見せて頂いたときに直感的に次のような感想を持ったの である。“施工時や引抜き作業時に影響を受けた可能性も考えられるとはいえ、おそらく被害 原因の大部分は地震時にあったのであろうと思う。あの地震による揺れはそのくらい酷いも のであったから…”。前述の地震応答解析で杭先端応力が過大になるとか、地震観測で杭先端 の歪みが意外に大きく出ている事例を知ったことが頭の中にこびりついていたために、こう した感想に結びついていたのである。

ただ、この写真はまだ一例であるに過ぎないのは事実であり、ほかの2本の杭の被害程度 との差異がどうして生じたのかについても、建設年や施工法を含めて詳しく検討してみる必 要性はあるであろう。3.11のような巨大地震の場合は本当にこうした被害事例が生じるのか を見極めるためには、なお事例調査を積み重ねる慎重さが必要ではある。それにしても、少 なくとも次の点だけは確信的に言えるであろう。地震時の問題として、とくに巨大被害地震 の場合には杭頭付近のみならず、中間層の存在などを含む杭先端まで、また、水平抵抗だけ でなく鉛直問題までを含めて総合的な検討をしなければならない。そういう時代がすぐそこ まで来ているのかも知れない。