

杭体応力度の符号が上部構造と逆になっていることについて

—旧建設省基礎指針に関する補足的記述(その1)—

(一社)基礎構造研究会代表理事 杉村義広

最近ある会合で杭基礎の耐震1次設計(具体的には旧建設省の「地震力に対する建築物の基礎の設計指針(日本建築センター、1984. 9)」(以下指針と呼ぶ)について話し合う機会があった。その際に、指針作成時の趣旨が十分に伝わっていないとか、誤解されているといったいくつかの事柄があることに気づき、指針作成に携わった者として補足説明をしておくことが不可欠であるとの経験をしたことがあるので、それらについて書き留めておきたい。

副題に示したように、今回は(その1)として杭体の圧縮応力度を+、引張り応力度を-とする上部構造の部材の取り扱い(構造力学では一般に引張り応力度を+とすること)とは逆になっている点についてその理由を述べる。

指針に示された杭種のうちPHC杭を例に取ってみると、PC鋼材の効果をコンクリートに換算して示されている。軸方向力 N (圧縮を正值、引張りを負値とする)と、曲げモーメント M (水平力の方向で生じる量を正值として扱う)を受けた場合の杭体応力度 σ は $[\sigma = N/A_e + \sigma_e + My/I_e]$ で表す。ここで、 A_e はコンクリート換算断面積、 σ_e は有効プレストレス(正值とする)、 I_e はコンクリート換算断面2次モーメントである。 y は中立軸からの距離であるが、関心事は縁応力であるので杭の半径を採用することになり、曲げ圧縮側の時正值、曲げ引張り側の時負値として扱う。結果として、合成された杭体の応力度分布は圧縮側で+、引張り側で-として表され、それぞれ短期許容圧縮応力度 f_c 、短期引許容引張り応力度 f_t を超えないことを符号付きの2つの不等式で表し、合成して $[-f_t \leq \sigma \leq f_c]$ で表している。

このように圧縮側を正值(したがって引張り側を負値)とした理由は次のような事情による。杭の歴史はジョサイヤ・コンドルの「造家必携(1886)」に示された木杭から始まっているが、地盤が軟弱であるために直接基礎では建物を支持するのに十分でない場合に補足的に使われたのが杭なのである。そのために杭にあっては支持力が最大の関心事であって、部材としては軸圧縮応力度(上記 σ の式で曲げモーメントの項を除いた値、ただし N は長期用の値を取る)が長期許容圧縮応力度(短期許容圧縮応力度とは別の値であるので仮に f_c で表現しておく)を超えないことの検討、すなわち常時の問題が最重要視されて来たのである。初期の頃のコンクリート杭はプレストレスを用いることはなかったし、無筋でもあったので A_e もコンクリートの実断面積 A_c として計算される値が長期許容圧縮応力度を超えないかの大小関係が基本的な重要事項であったと言える。すなわち圧縮だけの世界であり、引張りの意識はほとんどなかったために+の符号関係には余り関心がなく、いわばスカラー量、言い換えれば+の世界だけが意識されていたと考えることができる。

この状況は、基本的には建築学会の1974年版基礎構造設計規準・同解説の時代まで続いていたのである。尤もその規準では26条で「杭の水平耐力」も記述されているのではあるが、

擁壁や高低差がある敷地での建物に加わる土圧、あるいはアーチやシェル構造物の柱脚荷重の水平成分などが地震・風に先んじて挙げられていることから、地震は（風も含めて）必ずしも主要な対象とは扱われていなかった状況が読み取れる。28条の「杭材料の許容応力度」でも各種杭の長期許容圧縮応力度は細かく書かれているが、曲げやせん断に関しては上部各種構造の規準をそれぞれ準用すればよいといった簡単な記述がされているだけであり、そのことから地震時の検討は主要な扱いとはされていないと類推される。

以上に示した状況にあった中で1978年に宮城県沖地震が起これ、PHC杭の前身とも言うべきPC杭（当時は新しく強い杭が開発されたと受け止められていた）の杭頭せん断破壊事例が発生した。このことをきっかけにして、行政としても何らかの対応をしておく必要があるということになり、作成の検討がなされたのが上記指針である。その際に、当然ながら水平力を受けた杭の曲げモーメントに対する検討が必要となり、曲げ引張り側も考慮の対象となって符号をどうするかが問題になったわけである。構造力学の基本的決めごとに従って引張りを正とするかどうかの議論を重ねたが、圧縮を負値とすると従来支持力問題で考えていた杭体の圧縮応力度を $[\sigma = -\text{〇〇kg/cm}^2]$ などと表現する必要が生じ、長期許容圧縮応力度との関係も $[-f_c \leq \sigma]$ と表示することになって、見た目にも違和感を与えるだけでなく、杭体に生じる応力度を許容応力度より大きくすることを義務づけるのかなどとの錯覚を起し、混乱を招く恐れがあるとの意見が続出することになった。結局、式としては $[\sigma \leq f_c]$ の表現になるようにしておいた方がよいということになり、圧縮を+で表現することに決めたのである。今まで余り意識することがなかった引張り側を $[-f_c \leq \sigma]$ と表現しておくことで、符号による違和感は最低限に抑えることが出来るであろうと配慮したわけである。

以上が圧縮側を正值とした理由である。当時は建築学会でも「建築基礎構造設計規準・同解説」を「建築基礎構造設計指針」に改定する作業が進行中であって、杭の水平耐力については地震をより重要な検討対象として位置づけ、杭体の応力度についても同様の議論をしていたのである。そこでの成果を上記指針で採用したのであるが、建築学会の指針は全体をまとめるのに手間取ったために発行が1988年1月となり、世の中には3年余も早く上記指針の方が先行してしまったという経緯がある（2つの「指針」の性格については、例えば拙論「日本建築学会基礎指針の背景について、建築技術, pp.172-174, 2014.3」を参照していただきたい）。

なお、杭体の「応力度」という用語について、主として土木の分野の方から“「応力」はすでに単位面積当たりの概念であるのに、それに「度」を加えて表現するのは重複ではないか”との批判がしばしば出るについて言及しておきたい。筆者はその意見には一理あり、普段から一般用語としては「応力」や「応力分布」という表現も用いている立場にある。ただ、建築の分野では「杭体の応力度」という言い方が伝統的に引き継がれて来ている現実があり、それは学術用語にもなっている「許容応力度」に引きずられて一般用語としても「応力度」が定着してしまったものと推察される。学生時代からずっと聞き慣れた建築界での慣習でもあることを理解頂きたい。