

## 性能設計ではヒンジ形成を確認することが不可欠となる

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

今年(2016)の建築学会大会での基礎構造分野、とくに杭水平のセッションを聴いていて強く感じたのは2次設計(言い換えれば性能設計への道)を意識した論文が急増しているという点である。例えば、杭の水平抵抗解析で2点ヒンジの形成後の負勾配領域までもを評価する試みの論文があった。この種の発表を聴いていると、来たるべき性能設計では杭材に本当にヒンジが出来ているのかの確認が不可欠となることを強く感じた。そこで思い出すのは、かつて大会基礎のパネルディスカッションでBroms にならって1点ヒンジや2点ヒンジの崩壊形式を提案したことである。

建築学会の「建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)」の基礎構造編、とくに杭の水平耐力に関する議論は、ある意味ではその発想を発展的にまとめたものと位置づけられるが、ヒンジの形成が期待出来るのは高い変形性能を持っている杭に限られるという視点もそこでは併せて貫いていた。例えばPHC杭などの場合は、宮城県沖地震(1978)で杭頭せん断破壊の経験をしたこともあって2点ヒンジはおろか1点ヒンジの形成も無理であるから絶対に避けるべきであることを提案した(解析法自体は弾性支承上の梁曲げ理論を用い、地盤係数を低減することを推奨)。したがって、1点ヒンジの場合でも成り立たないと理由で建物を支持している杭のうち1本でも破壊に到達することがないように設計とすべきと考えていたのである。

一方、高い変形性能を有している杭の場合は、2点ヒンジの形成が期待出来るものとしてBroms の設計法を適用してもよいと考えることにした。このような杭として鋼管杭を想定していたが、SC杭もこの種の杭に入ると考えていたこと、また、場所打ちコンクリート杭も条件によってはこの種の杭に入るかと考えていたことは、最近の研究結果を知ってみると新たに直視しなければならないことも強く感じるようになってきている。ただ、鋼管杭では肉厚がかなり大きいもの、場所打ちコンクリート杭では長期許容支持力に対して十分な(安全率3を優に超えるような)余裕をもった場合との条件を想定してはいたのである。そのため“通常の場合場所打ちコンクリート杭(軸力比 $\sigma_o/f_c \leq 0.35$ )のものや、通常の鋼管杭(径厚比が50程度[STK51])などの場合は曲げ変形能力が中間に位置し、水平力の作用による杭頭降伏後もある程度の塑性変形能力を保持しうるが、地中部の最大曲げモーメント発生点に降伏ヒンジを形成するまで杭頭の塑性変形能力が追従できないことが一般的である。このような杭種については、弾塑性解析を行い、杭頭部が限界ひずみ(例えば鋼管杭では $\epsilon_{max} = 0.22t/r$  [  $t$  は厚さ、 $r$  は半径]、場所打ちコンクリート杭では $\epsilon_{max} = 0.3\%$ など)に達するときをもって終局水平耐力とする方法によるとよい”と記述して、必ずしも高い変形性能ではない場合もあることの注意書きは併記していたのである。

以上のように慎重な書き方はしていたとはいえ、具体的な杭を対象に類推を根拠にしてヒンジの形成に言及するなど大胆過ぎたかと、性能設計の時代を迎えようとしている現在の状況から見れば、やはり反省すべき点はある。なぜなら、SC杭に関する最近の研究では曲げ耐力は大きいものの変形能力はそれほど高くなく、急激な荷重低下を起こしてしまうことが知られるようになっており、今年の大会でも同様の結果を論じている論文が複数見られているからである。圧壊したコンクリートがばらばらになって中空部へ落ち込んでしまうのが原因であり、中空部をコンクリートで充填すれば変形性能も上がることも論じられている。筆者はこれを充填SC杭（FSC杭、すなわちFilled SC pile）と呼びたいと思っているが、そのような杭が実現すれば耐震性能杭と呼べる新しい既製コンクリート杭が生まれることが期待出来る。

鋼管杭については、筆者は杭頭接合部を含む鋼管杭に対して軸力作用下での大野式加力法による曲げ試験を一度行ったことがある（直径609.6mm、板厚9mmなので上記中間的な杭に相当する）。最終状況は曲げ圧縮側に局部座屈を起こして荷重が落ち始めるというものであった。その時には、同様の加力方式で行ったPHC杭の最終状況がせん断破壊の状況を示したのに対して、鋼管杭の場合は確かに破壊ではなく曲げ降伏タイプであることが確認出来たことに満足して試験を終了した。ただ、今から思えばさらに続けてその後の繰り返し荷重を行ってみるとか、出来れば両振り試験にするとか、最終状況について杭断面全体にわたっての観察を行うべきであったとの反省点は多い。断面の一部が局部座屈を起こしていただけで、それが本当に杭材としてのヒンジ（ピン）を形成することにつながっていたかどうかの確認と、その後の状況確認をしなかったことへの後悔を感じているからである。

場所打ちコンクリート杭については、既製コンクリート杭と比べて地震被害の報告例は少ない。ただ、これを地震被害がないと速断するのは避けるべきであり、地震に遭遇した事例自体が少ないために目立たないのかも知れないと考えておく必要があるであろう。構造的な性能に関する実験研究例がほとんど見当たらないことも場所打ちコンクリート杭独特の問題であり、性能特性がよく把握できていないことがこの気がかりを一層増大させている。大型実験施設を必要とすることが実験例の少なさの理由であるが、性能設計の時代になるとその辺りの解明が不可欠の条件とされるのは明白であり、解っていないものに関しては安全側の取り扱いをしておくことが当然であろう。ここでは、場所打ちコンクリート杭の場合でも杭頭部を鋼管で巻くという設計例が出始めていると聞いて、密実鉄筋コンクリートの場合でも健全な断面性能を確保するためにはS（steel）の手助けをさらに必要とする考えが出だしているのであろうかとの感想を持ったことを指摘しておきたい。