

基礎の2次設計は構造設計者の Know how

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

基礎の2次設計は構造設計者の Know how として競争手段の目玉とすればよいと筆者は機会あるごとに言ってきた。それとともに建築学会のような所が Recommendations としての指針を出すことには賛成であるが、行政的な基準を作るような動きに対しては反対であるということも合わせて持論として来た。

その理由は、基礎には（とくに杭基礎を思い浮かべて言っているのであるが）解明されていないことがまだまだ多すぎて、研究課題とはなるが設計マニュアルとしてまとめるまでには至っていないという点にある。すでに30年以上が経過してしまっているが、かつて建設省指針「地震力に対する建築物の基礎の設計指針（1984年に日本建築センターから設計例題を付して出版された）」をまとめた際に、2次設計までを指針に取り込むのはとても無理であること、後に同指針の第3版が出版された際に質問と回答が付録として掲載され（1989）、その中で2次設計が必要な場合は建築学会の「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」（1990）がよい参考になると書いたこと、などが思い出されるが、基礎の2次設計に関してはまだまだ解らないことが山積している事情はその当時と余り変わっていない。

ただその間に、地下室など根入れ効果（周辺地盤の側圧などの効果）については、液状化地盤の場合には地震力に対して抵抗力として働くよりはむしろ入力側に作用する（したがって地震力に加算する必要がある）ことが明らかになったなど、実際の地震被害観察やそれを解明するために行われた実験的研究を参照することを通じて多くのことが蓄積されて来た。

実は、根入れ効果が入力側となることを連想させる解析的な研究は筆者自身も以前に手がけたことがある。初めはPenzienモデルと呼ばれる地盤-杭基礎-建物系の質点系モデルで地震応答解析を行っていたのであるが、そのうちにこれ以上の単純化はできないというほどの簡単なモデルを作成して解析を試みるようになった。工学的基盤以浅の地盤を1質点に単純化し、それと並列に杭を含む埋込み基礎（地下室のある場合はそれも含めて想定）を1質点として地盤と相互作用ばねで結び、その上に直列に上部構造を1質点としてつなげたモデルである。モデルが簡単であるだけに、それぞれの質点の質量とばねはパラメトリックに扱うことにし、また地盤と基礎を結ぶ相互作用ばねは実際のパイルキャップ付きの杭の水平載荷試験の結果などから評価することを試みたが、その中味は小冊子にまとめたことがあるので関心のある方はそちらを参照されたい（拙著：『簡単なモデル解析による建物と地盤の動的相互作用』、建築技術、2006.1）。

ここでは先を急いで結果を見ることにする。上部構造すなわち建物の固有周期を T_b 、地盤の固有周期を T_g とすれば、 $T_b = T_g$ のケースは共振となり、地盤とともに建物は大きく揺れることになる。したがってこのケースは避けた方がよいのは言うまでもない。それを挟んだ領

域では、連成系1次振動（どこが最も揺れやすいかを示すことになる振動モード）は、 $(T_b > T_g$: 建物の固有周期の方が長いケース) と $(T_b < T_g$: 地盤の固有周期の方が長いケース) で対照的な傾向を示すことが認められる。グループ $T_b > T_g$ では建物の揺れが卓越し、相互作用力（言い換えれば埋込み効果）は抵抗側に働き、それに対して、グループ $T_b < T_g$ では地盤の揺れが卓越し、相互作用力は入力側に働くという特徴があることである。もちろん工学的基盤での入力地震動が持つ周期特性も関係するので、連成系1次振動だけでなく2次振動（グループ $T_b > T_g$ では地盤の揺れが卓越し、相互作用力は入力側となり、グループ $T_b < T_g$ では建物の揺れが卓越し、相互作用力は抵抗側となる）も時に注意の喚起が必要となる場合もあるが、基本的には設計上の関心は連成系1次振動に的を絞っておくことでよいと言えるであろう（連成系3次振動は両グループとも基礎の揺れが卓越するモードとなるが、その刺激係数はさらに小さくなるので設計上は余りにしないでもよさそうである）。

実はこのような解析を試みたのは、液状化が起こった場合も想定して地盤の周期は当初よりもずっと長く数秒にも伸びることになるだろうから $T_b < T_g$ の極端なケースに相当するのではないかと推測していたのである。この結果から、液状化の恐れがある地盤条件の場合には液状化以前（相互作用ばねは通常の地盤と同様に埋込み効果が抵抗側に働く場合）と、液状化以後（液状化によって相互作用ばねは小さく変化するであろうが埋込み効果は入力側になってしまう場合）に別けて両方とも設計して総合的に判断するのがよいと考えていたのであるが、基本的にはその考え方に間違いがないことがわかったわけである。

ただ、最近の地震ではそれ以上にこれまで気づけなかった新しい知見も数多く得ることになった。東日本大震災（2011. 3. 11）では通常の地震と比べて加速度（言い換えれば地震力）が大きいだけでなく、変位（揺れ）も驚くほど大きくなること、それも複数の地震が引き続いて数分にもわたって揺れ続けること（継続時間が長く、大きな地震が繰り返されること）を経験した。それに伴って、例えばPHC杭などでは耐震性があると思われていたC種の杭でもこれまでにないほどの大被害を受けて支持力を失い、過大な不同沈下や傾斜を起こす事例（この中には液状化の影響を受けてよりひどい被害タイプとなったものとか、津波によって転倒に至ったものも含まれる）が発生している。これらは、今後重要度の高い建物にはPHC杭は現状のままでは使えないのではないかとこの教訓を残した。また、先の熊本地震（2011）では、一度目（4. 14, 21:26）の地震ではなんとか持ちこたえた建物が二度目（4. 16, 1:25）の地震で崩壊したなどの例も観察され、建物の耐震性に関して新たな重要課題が突きつけられることにもなった。

以上のように、次第にわかってきたものが蓄積される一方で、まだまだわからないものが沢山隠れているので問題点は出尽くしたという気がしないとの実感を持たされる現状である。それが基礎の2次設計については構造設計者のKnow how とすればよいとの思いに結びついていく所以である。

なお、本稿では建物の固有周期と並んで、地盤の固有周期という言葉は当然のごとく使っているが、実際の地盤に立ち戻って考えるとこの言葉には多少の違和感が伴うのも事実である。その点については次回に言及してみたいと思う。