

スプレッドシートにおける鋼管杭基礎の簡易最適設計

金沢大学工学部 土木建設工学科

金沢大学大学院 土木建設工学専攻

金沢大学工学部 土木建設工学科

金沢大学工学部 土木建設工学科

近田康夫

岡林秀勝 ○

城戸隆良

小堀為雄

1. はじめに

現在、構造物設計において最適化は土木計画の中核をなす考え方である。つまり構造物を建設する側の立場はいかに安価に所定の強度を持ったものを建設できるかを前提として設計を行うことになる。

ところで近年のコンピュータの発達には目覚ましいものがあり、コンピュータを利用した土木構造物の最適設計プログラムも数多く開発されている。ところが最適設計の解法が非常に複雑であるためにそのプログラム自体は大型計算機または EWS での使用を前提としている。しかし、定形的な設計計算のプラットフォームがパーソナルコンピュータへと移行していることを考慮し、ここではパーソナルコンピュータを用いた簡易最適設計を試みる。

事務処理用に世界中で広く利用されているソフトウェアに Spreadsheet と呼ばれるものがある。Spreadsheet はこれまで土木工学への適用は積算処理等を除いてあまり見られなかったようである。しかしパーソナルコンピュータ上で稼働するソフトウェアの中で Spreadsheet は土木工学の定形的な構造物設計計算に非常に適していると思われる¹⁾²⁾。そこで本研究では Spreadsheet を利用して橋台の鋼管杭基礎の簡易最適設計計算を試みた。なお本研究では、Spreadsheet の中で代表的な Lotus1-2-3TM R2.2J を利用した。

2. Spreadsheet の利点

Spreadsheet を土木構造物設計に適用する利点は以下のようである。

まずフローチャートを作成する必要がなく設計計算のプログラムの作成が非常に簡単である点が挙げられる。また Spreadsheet ではセル上の任意のデータを変更すると、ただちに全計算が再実行され、結果の出力画面が書き換えられる再計算機能がある。これは経験などによる試行錯誤での繰り返し計算を行うことの多い土木構造物の設計計算作業に非常に適している³⁾⁴⁾。

3. 最適化手法

土木構造物の最適設計手法には解法が既に幾つか確立されその設計プログラムも存在する。一般的に構造物設計のような複雑な設計の最適化は、非線形計画法を用いることが多い。シンプレックス法などの線形計画法であれば、容易にパーソナルコンピュータ上でも実行可能であるが、非線形計画法では、その複雑な計算式のため最適解の算出プログラムは巨大なものであり、実用的でまた、様々の設計に適用できるような汎用性を持ったものはほとんど見あたらない。そこで本研究で使用する最適化手法では、非線形計画法を利用したものではなく、設計値として直接用いることができる全てのパラメータの組み合わせの中から最適なものを合理的な方法によって決定しようとする（列挙法を効率的に行う）ものである。

鋼管杭基礎の最適設計を行うにあたっては設計変数を定める必要がある。既存の研究では、杭径、杭本数、フーチング幅などを設計変数として最適設計計算が行われたが、与えられる外力条件のなかで鉛直力はフーチング幅の関数であるためにフーチング幅が変化したときに鉛直外力が変化しないのでは設計に矛盾をきたす。そこで本研究ではフーチング幅を先に決め杭径 D 、杭本数 n 、更に杭の肉厚 t 、斜杭の角度 θ 、その本数 s を設計変数に定め最適設計計算を行う。また目的関数として最も経済的となる組み合わせ、つまり杭基礎総重量 w が最小になるものを選び、制約条件としては常時と地震時の杭頭反力および杭断面の応力度の安全性を満たすものを最適案として採択されるものとする。

杭基礎設計において他に杭頭変位の安全照査の制約条件があるが前の条件に比べ許容値をこえる可能性が低いため得られた最適解で照査する。

安全であるかどうかの指標として杭頭反力または杭断面の曲げ応力の許容値に対する割合を 100 分率で表した数値を用い V_1 , V_2 , H_1 , H_2 , σ で表し, これらは以下のように定める.

V_1 : 常時垂直杭頭反力の常時の許容支持力に対する割合

V_2 : 地震時垂直杭頭反力の地震時の許容支持力に対する割合

H_1 : 常時水平杭頭反力の常時の許容支持力に対する割合

H_2 : 地震時水平杭頭反力の地震時の許容支持力に対する割合

σ : 杭断面に作用する曲げ応力の許容曲げ応力に対する割合

V は垂直方向力, H は水平方向力を表し添え字の 1 は常時を表し, 添え字の 2 は地震時を表し, これらの値は 100 分率で表す.

ここで設計変数, 目的関数, 制約条件をまとめて書くと次のようになる.

設計変数 杭本数 n , 杭径 D , 肉厚 t , 斜杭の角度 θ , 斜杭の列数 s

目的関数 杭総重量 $W \rightarrow \min$.

制約条件 $V_1 < 100$, $V_2 < 100$, $H_1 < 100$, $H_2 < 100$, $\sigma < 100$

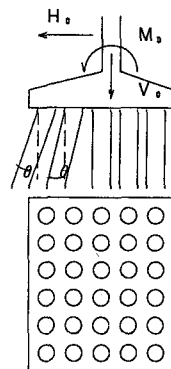


図-1 杭配置及びフーチングの形状

目的関数, 制約条件ともに非線形形式となり, この最適設計は非線形計画問題の一つに定式化される. これではパーソナルコンピュータ上で解くのは困難である.

本研究では先に述べたように高度な数学的手法は用いずに, 設計変数を様々に変化させ繰り返し計算を行い, その中から制約条件を満たし目的関数を最小にする設計変数の組み合わせを見つけるという方法でパーソナルコンピュータ上での最適設計計算を行う.

ところで設計変数の組み合わせは膨大な数ありそれらの全てを計算していたのでは時間がかかりすぎるためあまり実用的であるとはいえない. そこで効率的な列挙法を考えることにした. 前もって設計変数の変化が目的関数, 制約条件にどのように影響するかについて各変数の変化の検討を行って合理的な繰り返し計算の手順を確立し, マクロ機能を使って鋼管杭基礎最適設計計算スプレッドシートを作成し, 再計算機能を利用して繰り返し計算による最適設計計算を行うことにする.

鋼管杭基礎の最適設計するにあたり次のような条件を設定する⁵⁾⁶⁾.

(1) 杭とフーチング結合部は剛結とし, 各杭の形状は等しいものとする.

(2) 杭本数は 4 本 (2×2) から 100 本 (10×10) までとし, 断面寸法は JISA5525 に規格されているもののみとした. 斜杭の角度は 0° から 20° までとする.

(3) 荷重, 杭配置, フーチングの形状は図-1 に示すものを対象とする.

(4) 杭間隔は杭径の 2.5 倍以上とし, 群杭効果は考慮しない

4. 設計変数の変化が設計に及ぼす影響に関する検討

合理的な繰り返し計算の手法を見いだすわけであるが, そのためには設計変数の変化が設計全体にどのように影響を及ぼすかを調べる必要がある. そこで D , t , θ , s をそれぞれ単独に変化させ各変数が設計全体にどのように影響を与えるかを調べる. そこでそれぞれ設計変数を横軸にとり, 先に定めた V_1 , V_2 , H_1 , H_2 , σ の変化をグラフにまとめた. これらのグラフの形状は荷重条件, 地盤条件をさまざまに変えて計算しても同様なものが得られた. その結果が図-2, 図-3, 図-4, 図-5, である. これらによってそれぞれの設計変数が設計全体にどのように影響を与えるかわかる. まず図-2, 図-3, であるが, 荷重, 地盤条件などを与えてやり, 全ての変数を固定しておき斜杭の角度 θ だけを 0° から 20° まで変化させ繰り返し計算した結果である. V_1 , V_2 , H_1 , H_2 , σ は荷重条件, 地盤条件を変えて繰り返し計算をしたときも同様に変化しそのグラフの形状は変わらなかった. また杭本数, 杭径, 肉厚などの他の設計変数を変えてみたときも同様の結果が得られた. したがって斜杭の角度 θ が大きくなると, H_1 , H_2 は大きくなり

$M_0 > 0$ の時 V_1 , V_2 は小さくなり $M_0 < 0$ の時 V_1 , V_2 は大きくなり σ は小さくなるということがどのような荷重, 地盤条件のときにもいえ, さらに他の設計変数の変化にもよらず言えるということがわかった。次に図-2 と図-3 のグラフの違いはそれぞれのグラフの傾きの大きさでありこれは斜杭の列数 s によるということがわかった。図-2, は斜杭が 2 列のときの計算結果であり図-3, は斜杭が 3 列のときのものである。図-4, は肉厚 t を固定して繰り返し計算を行ったものであり, 肉厚 t が大きくなると H_1 , H_2 , σ は小さくなり, V_1 , V_2 は大きくなることがわかった。図-5, は杭径と肉厚の関係について調べたものである。3 種類の杭径で肉厚を 16mm から 6mm まで変化させた。杭径の大きいもののグラフはいつも杭径の小さいもののグラフの下にあるので杭径と肉厚の組み合わせを選ぶときまず杭径は最大のものを選ぶが良いということがわかった。

5. 繰り返し計算の手順

設計変数の変化が設計全体に及ぼす影響についての検討した結果をまとめると表 1 のようになる。そしてこの表により繰り返し計算の手順を決める。まずは杭配置であるがこれはどの杭配置が最も適切であるかということは一概にはわからないので考えられる全ての杭配置について繰り返し計算を行いその中から選出することにする。先に述べたように杭径をなるべく大きくして肉厚をなるべく小さくした方が杭重量を小さくすることができるので杭径は杭配置の条件を満たすもので最大のものをとる。つまり杭配置が決定すれば杭径も決定する。次に V_1 , V_2 の変化に注目する。肉厚の変化では V_1 , V_2 はほとんど変化せず肉厚が小さくなると $M_0 > 0$ のとき V_1 , V_2 は漸減するので最も大きい肉厚をとったとき V_1 , V_2 は最大になる。このことより最大肉厚をとっておけばそのとき V_1 , V_2 が "OK" (制約条件を満たすとき "OK" そうでないとき "NG" と表す) であれば肉厚を小さくしていても V_1 , V_2 は必ず "OK" となる。次に H_1 , H_2 に注目すると斜杭の角度 θ が大きいほど H_1 , H_2 は大きくなり斜杭の列数 s によってその度合いが変わる。

斜杭の列数が少ないほど θ が大きくなったときの H_1 , H_2 の増加の割合が大きくなる。また H_1 , H_2 , σ は t が小さくなれば小さくなる。以上のような理由から最適な杭配置と杭径を求めるための繰り返し計算を行うとき肉厚はその杭径での最大のものを取り V_1 , V_2 が "OK" となったものを抜き出す。これらの抜き出されたもののうち杭重量の最も小さいものを選び H_1 , H_2 が "OK" となる最小の肉厚を選んだとき杭重量は最小となる。またフーチング底面に作用するモーメント M_0 が $M_0 > 0$ であるとき, θ や s が大きいほど V_1 , V_2 , σ は小さくなるので, 繰り返し計算を行うとき θ , s は最大のものをもって $M_0 < 0$ のとき $\theta = 0$, $s = 0$ をとておく。最適設計の手順をまとめると, 図 6 に示すフローチャートのようになる。このフローチャートに従って繰り返し計算を行

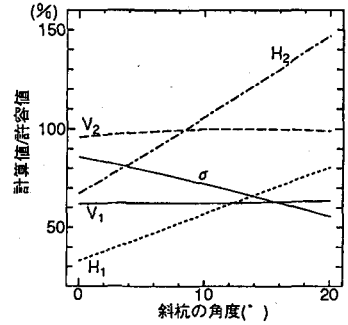


図-2 斜杭の角度 θ の変化

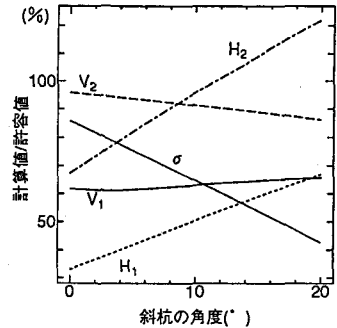


図-3 斜杭の角度 θ の変化

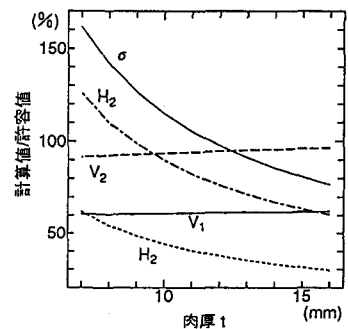


図-4 肉厚について

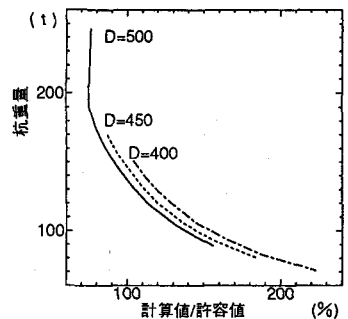


図-5 杭径 D と肉厚 t の関係

うことによって、全ての設計変数の組み合わせを計算するよりもかなり繰り返し計算の回数を減らすことができる。

6. 鋼管杭基礎最適設計 Spreadsheet

フローチャートに従って鋼管杭基礎最適設計スプレッドシートを作成した。荷重、地盤条件、杭長、フーチングの大きさを入力してマクロ機能を実行すれば自動的に制約条件を満たし杭総重量を最小にする設計値の組み合わせを算出することができる。

7. 結論

橋台の鋼管杭基礎を事例として簡易最適設計を行った。そのために設計変数の変化が目的関数、制約条件にどのように影響を与えるかを調べ、そしてその結果を利用して繰り返し計算による最適設計計算のための手順を確立し、必要な荷重条件、地盤条件、フーチングの大きさを入力することで目的関数である杭の総重量を最小にする設計変数の組み合わせを自動的に計算することができる鋼管杭基礎最適設計スプレッドシートを作成した。

現在、杭基礎の設計は、一般にコンピュータを部分的に使用しているものの、設計基準に基づいて設計者が今までの経験をもとに試行錯誤で行っているのが現状である。本研究では Spreadsheet を用いて最適設計計算を非線形計画法などの高度な数学的手法を用いずにパーソナルコンピュータ上で行うことができた。本研究では最適設計計算の目的関数として杭総重量を選んだが総費用で行えばより実的なものになるであろう。

本研究で行ったような繰り返し計算は BASIC や FORTRAN を使用しても行うことができるが設計自体のプログラムを作成することが圧倒的に容易であることと、再計算機能により最適解を求めたあとの設計値の微修正を行うことが容易であるということが Spreadsheet を用いたことの利点である。この方法は今回は鋼管杭基礎を事例として行ったが他のいろいろな構造物の設計にも容易に適用できるであろう。

参考文献

- 1) Sterve, W. and Lee, S.: Structural design of concrete columns using spreadsheet graphics, Computer Applications in Structural Engineering, ASCE, pp.232-240, 1987-7.
- 2) Andrei, R. and Julian, S.: Prestressed concrete beam design, Computer Applications in Structural Engineering, ASCE, pp.383-394, 1987-7.
- 3) William J. Orveis: 科学技術計算のためのロータス [1-2-3] 活用編, 啓学出版, 1990
- 4) 近田康夫, 城戸隆良, 小堀為雄: パーソナルコンピュータ上での簡易最適設計に関する研究, 金沢大学工学部紀要, 1990
- 5) 日本道路協会: 道路示方書・同解説 共通, 下部構造編, 1990
- 6) 岡原美知夫, 高木章次, 五十嵐功, 川上圭二, 前田良刀, 藤田宏一: 杭・ケーソンおよび鋼管矢板基礎の設計計算例, 山海堂, 1991

表-1 設計変数と制約条件

	V_1, V_2 が NG のとき	V_1, V_2 が NG のとき	σ が NG のとき
D 杭径	大きくする	大きくする	大きくする
t 肉厚	小さくする	大きくする	大きくする
θ 斜杭の角度	$M_o < 0$ のとき 小さくする $M_o > 0$ のとき 大きくする	小さくする	大きくする
s 斜杭の列数	$M_o < 0$ のとき 小さくする $M_o > 0$ のとき 大きくする	大きくする	大きくする

制約条件を満たすとき OK そうでないとき NG

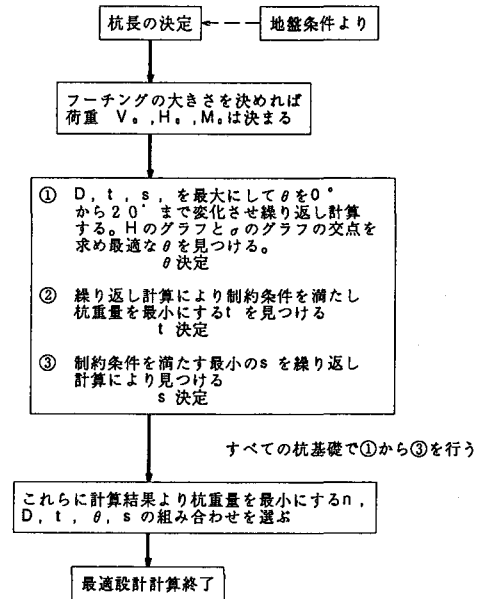


図-6 フローチャート