

1. まえがき

建設省では、土木構造物設計の合理化を図るため設計頻度の高い構造物に対して標準設計図案の制定と設計の自動化を推進している。前者は設計情報とあらかじめ図面の形で用意しておくものであり、後者は設計計算から図面作成までを電子計算機によって行うものである。

本稿は後者の中からくい基礎設計の自動化を取り上げ、その中で用いている最適設計の求め方について橋梁下部工を例として紹介したものである。

2. 最適設計の求め方

くい基礎の設計にあたっては、施工場所の環境条件、施工条件及び土質条件等から、まずくい種が決定され、それから上部工反力や土質条件等の設計条件を満足するために必要なフーチング寸法、くい長、くい径、くい本数及びくい配置等の構造諸元が決められるのが一般的である。

この場合、図-1でも判るように設計が可能となるケースが多く考えられる。例えば、フーチング寸法を橋軸直角方向幅 $B_1 = 9.0\text{m}$ 、橋軸方向幅 $B_2 = 8.0\text{m}$ とした場合、くい径、くい本数等の組み合わせによって設計可能となるものが6種類ある。そして、

フーチング寸法をいろいろ変えていくと全体では145種類もの設計可能解が求められることがわかる。

したがって、これらの中から最終的には設計成果を見つけ出すには、何らかの形で最適性を評価する基準を設定する必要がある。評価基準としては、一般的には経済性、力学的安全性及び施工性が考えられるが、施工性は前述のようにくい種の決定の際にすでに考慮されているものと考え、図-2の模式図に示すように、経済的には最適と考えられる形状群を選び出す第1評価基準とさらにその中から力学的に最も秀れた形状を選び出す第2評価基準を考えた。

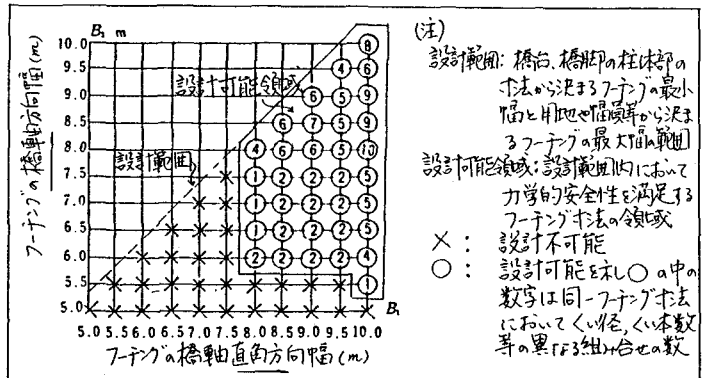


図-1 設計範囲と設計可能領域

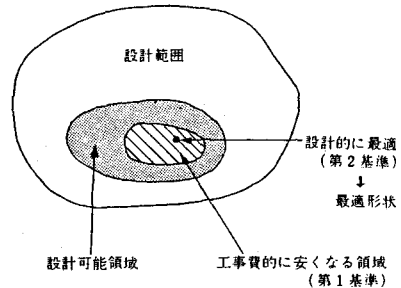


図-2 最適設計の概念図

(1) 経済性による文1評価基準

① 経済性を評価する尺度の選定

橋梁下部工の工事費は、一般管理費を除けば直接工事費と目的物を構築するための工事用道路、締切り工、水路等の切廻し、安全施設、仮設備等に必要の間接工事費に大別される。このうち、間接工事費は現場の施工条件に左右されることが多いので、これを正確に反映した経済的評価基準を設定することは極めて困難であること、又、フーチング寸法を小さくすれば、締切り面積も小さくなり、ひいては間接工事費が安くなることから、間接工事費は直接工事費にほぼ比例すると考え、経済性を評価する尺度としては、直接工事費のみを考えればよいことにした。

② 評価方法

図-3に示す張り出し式橋脚について説明すると、まず直接工事費は

① 躯体部

② 基礎部(フーチングとくい)

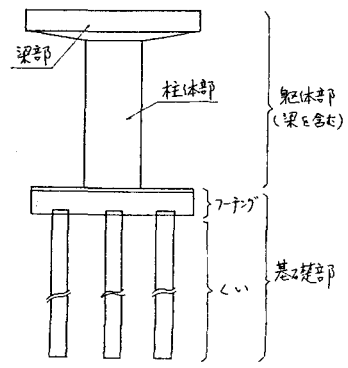


図-3 張り出し橋脚の構造部

に大きく別けられる。このうち①の躯体部については、柱体部を設計断面内でできるだけ小さくし、それに適合した梁寸法とする方が躯体の体積、くいに対する外力が小さくより経済的となるということから決定されるので、評価の対象には含めず、②の基礎部について比較することとした。

くい種ごとの材料費と施工費の関係を図-4に示すように、くい長が短い程、くい径が小さい程、施工費の占める割合が大きくなっており、経済性の評価基準は、くい材料費と施工費を用いることとした。

すると、くいとフーチングの直接工事費(Q)は次式で表わされる。

$$Q = \text{くい材料費} + \text{くい施工費} + \text{フーチングの材料費} \\ = n \cdot V_p \cdot C_p + n \cdot T \cdot F + V_f \cdot C_f \quad \text{--- (1)}$$

ここに

- n : くい本数(本)
- V_p : けいの重量又は体積(本, m^3 /本)
- C_p : けいの材料単価(円/本, 円/ m^3 、場所打ちけいの場合は、材料費の他にコンクリート打設費、鉄筋の加工組み立ての費用を含む)
- T : くい1本当たりの施工時間(本/本)
- F : けいの単位時間当たりの施工費(円/本)
- V_f : フーチングのコンクリート体積(m^3)
- C_f : フーチングの材料単価(円/ m^3 、コンクリートと鉄筋(70kg/ m^3)の材料費、コンクリート打設費、鉄筋の加工組み立て費を含み、型枠は無視している)

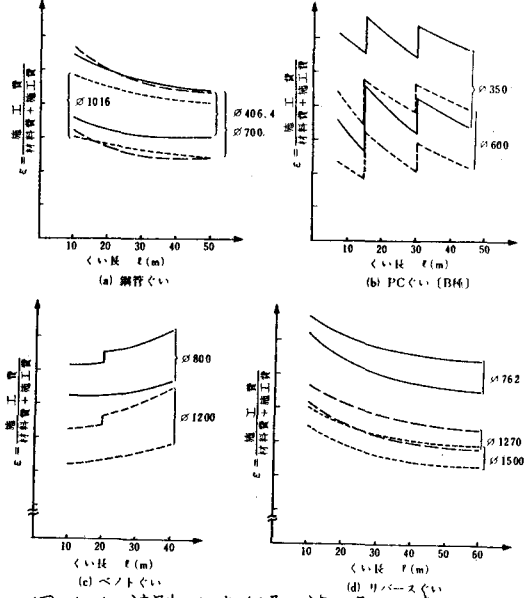


図-4 くい種別のくい材料費と施工費の比率

さらに、(1)式をフーチングの材料単価(C_f)で除し、くい材料費とくい施工費をフーチングのコンクリート体積(V_f)で換算した形(これを換算体積(c))と定義)で表し(2)式を設定した。

$$C = \frac{Q}{C_F} = \frac{C_P}{C_F} n \cdot V_P + \frac{T \cdot F}{C_F} n + V_H$$

$$= \alpha \cdot n \cdot V_P + \beta \cdot n + V_H \quad \text{----- (2)}$$

$$= \alpha \cdot n \cdot V_P + \delta \cdot \alpha \cdot n \cdot V_P + V_H = \gamma \cdot n \cdot V_P + V_H \quad \text{----- (3)}$$

ここに

δ : くい材料費に対する施工費の割合

$$\left(\delta = \frac{\beta}{\alpha \cdot V_P} = \frac{T \cdot F}{C_P \cdot V_P} \right)$$

γ : くい施工費を含めた材料費の体積換算係数

$$(\gamma = \alpha(1 + \delta))$$

ここで、 α ($= C_P / C_F$) は建設物両資料等によって定量化し、 β ($= T \cdot F / C_F$) の T, F については積算基準を回帰分析することによりくい種ごとに定量化した。さらに、くい材料費とくい施工費の関係が図-4に示すように、ほぼ一定のルールがあることから(2)を(3)式のように設定し評価することとした。

③ 換算体積が最小とみなせる範囲

求められた多数の設計可能解の中から、前項の換算体積が最小であるものを選定するだけでは構造的に最良のものを選定しえないことも考えられる。そこで、最小換算体積と同程度として扱うことができる範囲を設定し、その中に含まれるものから文2の評価基準を使って選定するようにすると、構造的にもより良いものが選定されることになる。

換算体積がほぼ最小とみなせる範囲を決める手段としては

- ① 換算体積を算出する式の持つ精度から範囲を設定する方法
- ② 計算によって求められた最小換算体積に対して、一定の幅を設定する方法(範囲内の個数は、設計条件によって変化する)
- ③ 文2評価基準で最終的な判断を下すのに必要な個数をあらかじめ決めておく方法

はとが考えられるが①は、各組織の積算基準が異なるので妥当性が薄い。

したがって、②及び③を考え合わせた形で検討を行った。すなわち、一般的に判断から最小換算体積に対して +2.5%、+5%、+10%を考え、これを既往設計の設計条件を用いて試算し、その妥当性を検討してみた。図-5は、鋼管ぐいの場合であるが、これによると+10%の範囲を考えた場合では、設計可能領域の大部分となってしまい範囲にすぎ、逆に+2.5%では個数が少なすぎて文2評価基準で判定する以前に形状が決まることも考えられる。

これに対し+5%の場合は、対象となる個数も適当であり、換算体積が最小とみなせる範囲については、+5%を設定するのが妥当と判断した。

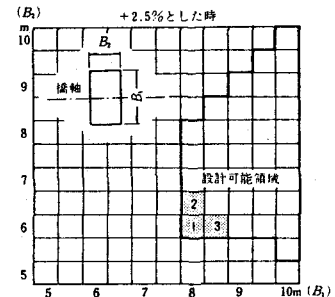
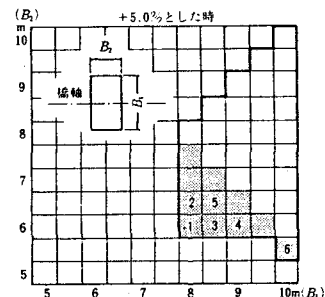
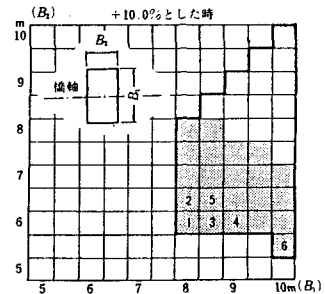


図-5 最小換算体積に対して同程度とみなせる範囲(鋼管ぐいφ800の一例)

(2) 力学的安全性による文2評価基準

① 安全性を評価する要素

くい基礎の力学的安定性については、安定計算と構造成算の検討を行う必要があるが、フーチングを含めにくい基礎の形状は、安定計算で決まることから、安全性の評価としては、安定性を用いる方が妥当と思われる。そこで、安定性を表わす指標としては余裕度（許容値/計算値）を用いて評価することとした。

さて、くい基礎での安定性の検討は、通常以下の④～⑥の要素について行われるが④、⑤についても検討されることがあり、④～⑥の各要素に対する余裕度（ f_i ）を使って比較評価をすることにした。

④ くい軸方向押圧力 $\leq$ くい軸方向押し許容支持力 ⑤ くい軸方向引抜力 $\leq$ くい軸方向引抜許容支持力

⑥ くい頭水平変位量 $\leq$ くい頭許容水平変位量 ⑦ くい軸垂直方向力 $\leq$ くい軸垂直方向許容支持力

⑧ 橋座位置水平変位量 $\leq$ 橋座位置許容水平変位量

② 評価方法

表-1 文2評価基準の評価方法

文1評価基準で選り出された設計成果から安定性に関して、最も良いと思われる設計成果を選定するための評価方法として表-1に示すものを考え既設設計例に適用し検討を行った。	評価方法	考え方	特長	有意性
その結果、表-1に示すように余裕度の最小値を最大とする評価方法が力学的に最も良い設計成果を選定することができると判断し、本自動設計プログラムの文2評価基準とした。	余裕度の分散を最小にする方法	各要素の余裕度（ f_i ）が同程度分布状態を示すものを最適とする方法	・一要素の余裕度が極端に大きいものを含めたりする ・文1評価基準の傾向と同傾向を示し独立性が高い	△
	余裕度の平均値を最大にする方法	各要素に重みづけすることが困難なので、すべての要素を同等に取扱いその余裕度の平均値の最大を最適とする方法	・一要素の余裕度が極端に大きいものを含めたりする ・分散を最小にする方法と逆傾向にある。言い換えば文1評価基準に対し独立性が高い	○
	余裕度の最小値を最大にする方法	各要素の余裕度の中で最小のものに着目し、これが最大となるものを最適とする方法	・極端に余裕度の高い要素を含めない ・文1評価基準と逆傾向を示し独立性が高い	◎

3. おわりに

構造成設計を電子計算機を利用して自動化しようとする場合には、設計アルゴリズムを明確化し、これまでの技術者の経験や過去の設計事例から得られる設計情報等を電子計算機にうつしかねることが必要である。くい基礎の自動設計プログラムの開発においても、そのために種々の検討を行ってきたが、特に最適設計成果を得るための評価基準の設定では、従来この種のプログラムでは考慮されていなかった積算面を一部考慮している。

その結果、既設設計と比較してみると2割ほど費用が軽減できるケースもでており自動設計によって経済的な設計が可能であることが判明した。

また、くい基礎、自動設計プログラムを、これまでに開発された各種の橋梁上部工設計プログラムと連系させることによって、橋梁設計を総合的に行うことのできるシステムとすることができ、この他、開発されたプログラムによって、各種の条件に対するデータを発生させることによって設計照査や概略設計のための資料を作成することもできる。

(参考文献)

池村、久吉、工藤、村橋： くい基礎自動設計の合理化に関する研究，土木研究所報告文162号。