

ニューマチックケーソン基礎自動設計 の合理化に関する研究

STUDY ON RATIONALIZATION OF AUTOMATIC DESIGN OF PNEUMATIC CAISSON FOUNDATION

岩松 幸雄*・平川 脩士**・山本 洋一***

By Sachio IWAMATSU, Shuji HIRAKAWA and Yoichi YAMAMOTO

1. はじめに

わが国における昭和 48 年度の道路橋の建設は約 1 300 橋にのぼり、これらの基礎形式として施工されたケーソンは約 240 基であるが、道路幅の拡大傾向に伴う上部構造の大型化、公共用地確保の困難に伴う建設環境（地質条件等）の劣悪化は基礎形式の中でのケーソン基礎の比率を高める要因と考えられよう。

一般に基礎工事は、それが調査・試験などで確実に知見しがたい地下を対象に行われるため、その計画・設計においても個人の知識・経験が尊重される傾向にある。もっともそのことは一見アルゴリズムの確定しているかに思える上部構造の設計でも同じことで、たとえば図-1¹⁾は、一般的な構造物の現行設計行為の 1 断面を示したものであるが、図に示すように条件設定から設計図書作成の段階まで設計者の知識・経験によって左右されていることから理解されよう。そして、ケーソンの設計においても設計者は単なる構造計算のみでなく、土質をはじめとする調査・試験結果の設計条件への入力、剛体基礎としての安定性に関するモデルの適用性、そして施工方法や施工順序に応じた施工時応力と部材応力度との関係などを総合的に検討し、判断しうることが要求される。

そこで筆者らはニューマチックケーソン基礎（以下ケーソン基礎とよぶ）設計の自動化にあたり、これらの個人的あるいは技能的判断によって設計されている部分の合理化ないしは技術化を行うことを試みた。すなわち、本研究は、スパン 60 m 程度、幅員 4 車線までの道路橋を対象としたケーソン基礎の自動設計プログラム開発の過程で、従来、設計行為の中で知識・経験に基づいて決定論的に設定されていた部分の定量化やモデル化を行

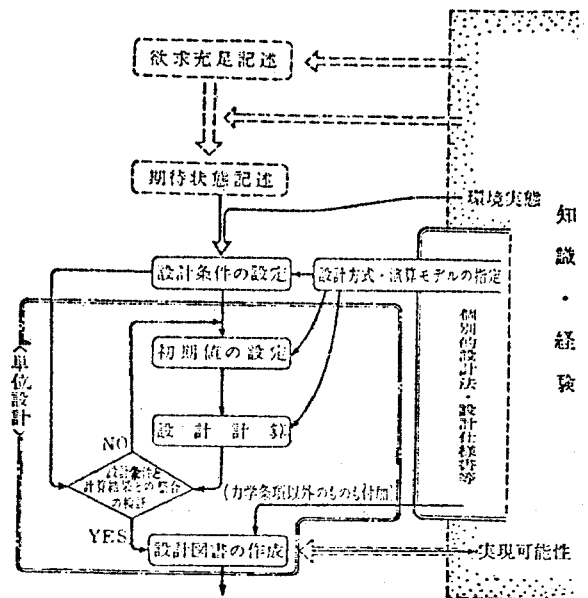


図-1

い、その数値やモデルを再びプログラムに組み込み全体の調整をとることの繰り返しで行った。したがって、1つの結論は新しい課題を提供することになり、分析にもさまざまな手法が展開されることになったが、ケーソン基礎設計自体が他の固有技術や固有学問の進展に待たねば完全な論理モデルでの全体構築は困難であり、ためにわれわれの研究のアプローチも単なる理論の展開に陥ることをいましめ、常に既往設計例および工事記録による検証を心がけて進めた。

また、設計の汎用性を高めようとするれば、とかくインプットデータが多くなりがちであるが、筆者らは主成分分析などによりデータの内生化を行い、約半分のインプットデータで、標準的な構造では処理しうることを確認した。

* 正会員 建設省土木研究所企画部システム課長

** 正会員 東亜エンジニアリング

*** 正会員 白石基礎工事(株)技術部開発課

2. 設計アルゴリズムの合理化

従来の手計算によるケーソン基礎の設計は「道路橋下部構造設計指針・ケーソン基礎の設計篇」(日本道路協会) (以下「ケーソン指針」とよぶ) を骨子とし、これに設計者の知識と過去の経験や設計例などを肉付けして行われてきたが、電子計算機による設計の自動化をはかる場合は、これらの知識や経験などの合理化・定量化が必要となる。したがって自動設計システムの開発にあたり、従来の設計および施工法を調査し、主として次の4点について検討した。

- ① 評価基準の設定
- ② 設計アルゴリズムの基準化の検討
- ③ 設計の省力化の検討
- ④ 調査データと設計条件の検討

以下にこれらの検討結果について述べる。

(1) 評価基準の設定

ケーソン基礎設計結果の評価要因として、一義的には工事費を主体とする経済性、力学的安定性および施工性などが対象となるが、これらのうち施工性については次節で述べる設計アルゴリズムと関連が深いので本節から除外し、本節では経済性および力学的安定性についての検討結果について述べる。

a) 経済性評価の検討

ケーソン基礎の工事費としては、棧橋工、築島工、機械・電気設備および共通仮設備などの間接工事費と構築およびケーソン沈下掘削工費などの直接工事費に分類されるが、ケーソン工事における工事費のうち間接工事費の占める割合はケーソン沈設位置の地盤条件や施工条件などにより大きな変動があり、経済性を検討するにあたり、間接工事費を包含したものを比較するのはきわめて困難を伴う。このため経済性を評価する尺度として直接工事費をとりあげることにした。

直接工事費 (P_r) は構築工費 (P_1) と掘削沈下工費 (P_2) にふくまれる各工程の工事単価 (C_i) と数量 (x_i) の積の値の総和であり、

$$\left. \begin{aligned} P_r &= P_1 + P_2 \\ P_1 &= \sum (C_i \cdot x_i) \\ P_2 &= \sum (C_j \cdot x_j) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。昭和 48 年度施工のニューマチックケーソン基礎の実績 8 橋 17 基をとりあげ P_r について調査すると、ケーソン掘削土量と P_r の間には図-2 に示すようにほぼ直線的な関係がみられる。したがって P_r は

$$P_r = a \times (\text{掘削土量}) \dots\dots\dots (2)$$

で表わされ、ケーソン基礎の経済性を有効に評価できる

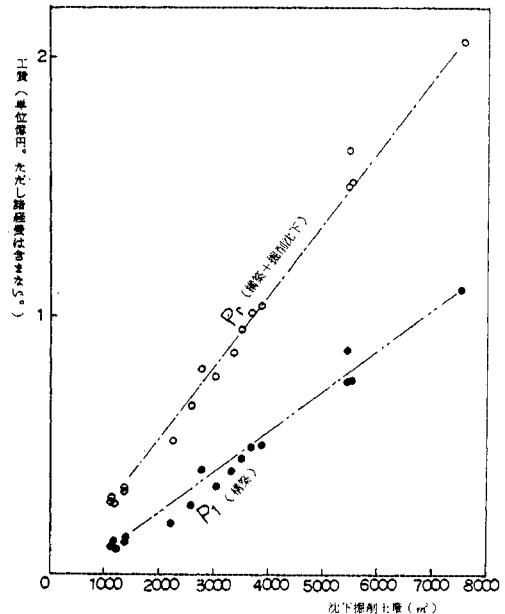


図-2 沈下掘削土量と工費

尺度は掘削土量であるといえる。図-2 において P_1 と P_2 の比はほぼ 1:1 程度となっているが、これは P_2 にはケーソンの据えつけ地盤造成や施工に関連する機械設備費および機械損料などを含めていないからであり、これらの工費を考慮に入れると P_1 と P_2 の比は約 3:7 ~ 4:6 程度になる。また図-2 より掘削土量と構築工費の関係は、細部では多少の変動がみられるものの、ほぼ正比例しているといえる。この変動は、従来ケーソン基礎を設計する場合ケーソンの外かく寸法(長径、短径および躯体長)が決定されると、各部材の断面寸法はケーソンの沈下関係がほぼ満足される範囲内で経験またはトライアルに設定される場合が多く、同一設計条件下ではコンクリート体積の増は使用鉄筋重量の減少、また体積減は増大の傾向をもつことに起因するためである。ここで掘削土量、コンクリート体積およびケーソン鉄筋コンクリートの単位使用鉄筋重量の関係を調査してみたが、図-3 に示すように同一条件下でも単位使用鉄筋重

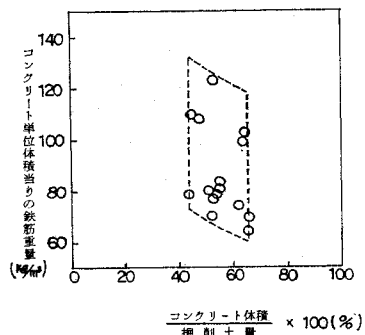


図-3 主要数量関係

量に、かなりの変動範囲があることがみられ、これは同一条件でも、単位使用鉄筋重量の増減がある程度構築工費に反映しているためといえる。一般的にいって、ケーソン基礎の外かく寸法の増減は構築工費に正比例するので、ケーソン基礎の立体形状が特殊なものでない限り、掘削土量と構築工費はほぼ正比例するといえる。なお本項でケーソン基礎の経済性を評価する要因から間接工費を除外したのは、施工位置のローカルな問題が間接工費を大きく支配するうえ、掘削土量は送気設備費や電力設備費などの間接工事に影響をおよぼすが、構築工費は間接工費に大きな支配力をもたないので、これら間接工費を含めると評価基準の設定に困難をきたすからである。

以上のことから目的変数として掘削土量を取り、設定された範囲内でこの値を最小にすれば、もっとも経済的であるとの評価がえられる。ケーソンの掘削土量は一般的にいって、

$$V_{ex} \approx A \cdot l \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 V_{ex} : 掘削土量 (m³)

A : ケーソン底面積 (m²)

l : ケーソン根入れ長 (m)

であり、同一根入れ長のケーソンであれば、掘削土量を最小にするためにはケーソン底面積を一定の制限内で最小にすればよい。なおケーソンの根入れ長は必ずしも安定計算から決定されるものではなく、むしろ支持地盤高により決定される場合が多い。したがってケーソンの工事費の経済性を評価する条件はケーソンの底面積いかんで決定されることになる。

b) ケーソン基礎の力学的安定性に関する検討

ケーソン基礎の設計においては、ケーソンの断面形状および外かく寸法の選定がもっとも重要な事項であり、これらの最終決定は一般に安定計算結果による場合が多い。

ケーソン基礎の安定度の照査は「ケーソン指針」に基づいて、ケーソンを弾性地盤中に存在する剛体基礎とみなして行われており、その安全率 (S) は式 (4) で示される。

$$S = (\text{地盤の許容支持力度}) / (\text{地盤反力度}) \dots \dots \dots (4)$$

ケーソン基礎の安定性をみたく条件としては、各外力状態に対して底面地盤および側面地盤の S の値が 1 以上であり、かつケーソン天端の変位量が許容変位量を超えないことである。ケーソン天端の変位量は上部構造からの制約をうけるので、この値を固定値と考えると、ケーソン基礎の力学的安定性の評価は底面と側面地盤に対する安全率について検討すればよく、本節ではこれらについて検討することにした。

ケーソン基礎の安定性についてはこれを支配する力学モデルはかなり複雑であり、各安全率相互間の関係が不明確であるので、安定性の総合評価の方法として以下の 3 点につき、ケーソン基礎の底面積を一定にし、長径および短径寸法が変化したときの安全率の挙動を調べた。

- ① 安全率の平均を最大にする場合
- ② 安全率の最小値を最大にする場合
- ③ 安全率の分散を最小にする場合

上記の条件のもとで数多くの既往設計計算を行った結果、以下のことが判明した。

① 長径・短径比が変化してもすべての安全率が増加することはない。たとえば底面地盤の安全率が増大すると側面地盤の安全率は減少するといった傾向が一般的には生じる。

② 安全率の一成分の増の割合と他成分の減の割合は設計条件により異なる。また安全率の中でクリティカルな成分は 1~2 個である場合が多い。

以上のことから安全率の平均値の最大化を安定性の総合評価の基準とすると、十分安全側である一成分の増分が最大である場合にはクリティカルな成分の安全率がさらに減少するといった力学的には危険側の結果を生じるおそれがある。

そこで力学的には許容抵抗力に見あった反力の分担を行うことが望ましく、この考え方は安全率の均等化にも通じる。こうした方法は一般に多変数を対象とする場合統計的処理によって初期の目的をはたしうる。

したがってケーソン基礎の安定度の総合評価基準として安全率の分散の最小化をはかり、その結果をもとにすることにした。図-4 は上記の事項を検証するための数値計算例であり、設計条件の主要事項は図-10 に示すとおりである。この計算例は、橋脚躯体の寸法に支配されるケーソンの外かく寸法を制限外においているが、最小安全率の最大化と安全率の分散の最小化とは比較的類似した傾向をもっている。

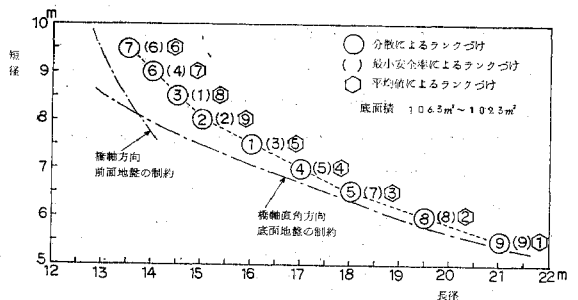


図-4 安全率の評価によるランクづけの一例

(2) 設計アルゴリズムの基準化

電子計算機による設計の自動化のためには設計思想の

体系化と、従来経験や判断に依存してきた部分の定量化を行う必要がある。ケーソン基礎の設計思想の体系化は「ケーソン指針」に示されているが、この指針に記述されていない事項も多くあるため、最近におけるニューマチックケーソン基礎の設計・施工例のうちから約 50 例について追跡調査を行い、既往実績に共通するものをくみとり、設計アルゴリズムを設定することとした。

a) 適用範囲に関する検討

1) ケーソンの根入れ長について

ニューマチックケーソン基礎の根入れ長の上限值は作業室内圧により限定をうける。作業員の安全衛生を確保するためには、ゲージ圧 3.0~3.2 kg/cm² の圧力が作業限度とされているが、近年地下水位低下工法を併用して作業室内圧を低下させてケーソンの沈下作業を行う場合もあり、ケーソンの根入れ長の上限值を特に設ける必要はない。また根入れ長が基礎幅（短径寸法）の 1/2 程度より小さい場合は直接基礎としてあつかうのが好ましく、本自動設計の対象外とし、既往のケーソンの断面形状を考慮して根入れ長の下限値を 10 m とした。

2) 断面形状について

ケーソンの断面形状としては、円形、小判形および長方形などが一般的に用いられているが、同一底面積に対する外周長の比は円形が最小で以下小判形、長方形の順となる。施工時におけるケーソンの据えつけ作業の難易や沈下掘削作業中の傾斜・回転などに起因する誤差は度外視すると、沈下作業においては一般に円形または小判形のケーソンの方が長方形のものよりも有利である。また構造面からも円形、小判形はアーチ作用が期待でき、断面を経済的にすることができ、さらに橋脚形状と類似させることによりケーソンの断面積をできるだけ小さくすることが可能となる。最近における施工例においても上部工の反力がきわめて大きなき以外は円形または小判形断面を採用するケースが多く、本自動設計においても断面形状として円形および小判形の 2 つのケーソンを対象とすることとした。

3) 断面寸法（外かく寸法）について

ケーソンの断面寸法は基礎としての安定性のみでなく

- ① ケーソンに載荷される構造物の寸法
- ② 施工誤差および鉄筋・型枠組立などの施工余裕
- ③ 用地の制限幅（一般には上部構造の幅までをとる）などを考えて決定される。本研究では上部構造の幅が 4 車線、スパン 60 m 程度までの道路橋基礎ケーソンを対象としているので橋軸直角方向の最大径として 24 m をとることとした。またケーソンの最小径は機械設備の制約条件および作業の安全性から定める必要があり、これを 4 m とした。

4) 各部材厚について

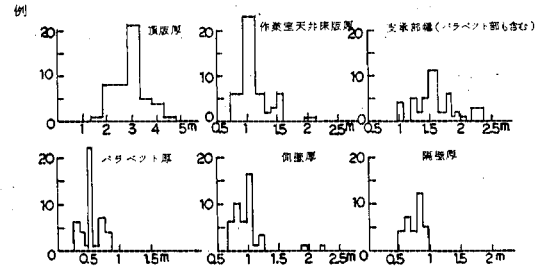


図-5 既往実績部材厚

表-1 各部材の最小値・最大値きざみ幅

(単位:m)

	最小値	最大値	きざみ幅
バラベット厚	0.3	0.8	0.1
側壁支承幅	1.0	1.7	0.1
側壁厚	0.7	1.2	0.1
刃口基部厚	0.9	1.3	0.1
隔壁支承幅	0.5	1.5	0.1
隔壁厚	0.5	0.9	0.1
頂版厚	1.5	4.5	0.5
支承厚	0.5	2.5	0.5
支承ハンチ高	1.0	2.0	0.5
下床版厚	0.8	1.5	0.1

図-5 は既往ケーソン基礎の施工実績における頂板厚、側壁厚および作業室天井スラブ厚などの各部材厚の分布を調べたものであり、この調査結果に基づいて自動設計では各部材に表-1 に示すような下限値および上限値を設定した。このために設計領域が制限されるという欠点をもつが、あえて上・下限値を設けたのは従来のケーソンのイメージを打破するような部材厚をもった設計結果を生じさせないよう考慮したからである。また各部材厚のきざみ幅は既往実績および施工精度を考慮して決定した。

5) 使用鉄筋について

使用鉄筋の材質は SD 30 で主筋および配筋の径は D 16~D 32 にし、配筋方法は原則として「コンクリート標準示方書」（土木学会）に準拠するが、ケーソンの部材断面は比較的大きいので鉄筋比に関しては上限値を設定し、0.8% 程度とした。なお鉄筋の組立作業およびコンクリート打設作業の能率を低下させないために頂板以外は 2 段配筋を行わないことにした。したがって鉄筋量の上限值は与断面に対してコンクリートおよび鉄筋の応力度がそれぞれ許容応力度に達すると仮定したときの鉄筋量（つり合い鉄筋比に相当する鉄筋量）、もしくは D 32—etc 100 mm のうち小の方をとることとした。

b) 各設計諸元決定アルゴリズムに関する検討

1) 最適ケーソン選定アルゴリズム

2. (1) で述べたようにケーソン基礎設計の最適化のための目的変数は底面積であり、底面積がほぼ同一とみなせる場合については次位の目的変数として基礎の安定性

に関する安全率の分散を設定することにした。すなわち、第1の評価基準として底面積の最小化をとり、第2の評価基準として安全率の分散の最小化を設定することである。本自動設計においては、ケーソン外かく寸法の変化のきざみ幅を0.5mの不連続量としているため、第1の評価基準である底面積の最小化においても最終解は真の絶対最小底面積とは異なった近似解を選定する場合が一般的であり、この近似解は外かく寸法のきざみ幅に支配される。また底面積の誤差は小であってもケーソン形状(長径, 短径比)の変動については予測できない。このような不合理を解消するために底面積最小条件を緩和し、第2の評価基準を導入した。底面積最小条件の緩和区間の大きさの設定については以下の検討結果より設計可能な最小底面積に対して2.5%の大きさとした。すなわち、

① 自動設計で対象とするケーソンの外かく寸法のきざみ幅は0.5mであり、ケーソン底面積の分布は、下限値約20m²、上限値約220m²であり、また分布のピークは約100m²前後であり、全体の70%は約60~170m²の間に含まれる。

② 底面積最小条件の緩和区間の上限値は掘削土量の差による工費の鋭敏性から5%と設定した。この値を上限値として緩和区間の大きさを仮定し、その緩和区間に含まれるケーソン外かく寸法の組数およびその分布状態を、ケーソン底面積60~170m²について調べたところ、緩和区間を5%にすると10~18通りの組数が存在し、2.5%にすると3~9通りの組数が存在する。

したがって実用上2.5%程度の掘削土量の差は無視でき、また力学的安定性および演算時間の面から合理的な形状選定範囲になりうると判断し、底面積の緩和区間を2.5%とした。

なお最適ケーソン選定手順については後節3.(3)a)で述べる。

2) 各 部 材 厚

ケーソン各部の部材厚を決定する場合、構造計算のみでなく、施工時におけるケーソンの沈下関係と各部材厚間の相互関係をも考慮しておかなければならない。したがって、本項では以下の条件について検討することにした。

④ ケーソンの沈下関係の照査

施工時においてケーソン重量が軽すぎると作業室内圧、ケーソン周面摩擦力などの沈下抵抗力の作用でケーソンが沈下しなくなる事態が生じる。一般にケーソンは自重による沈下を原則としており、設計にあたっては予想される沈下抵抗力に見合うだけのケーソン重量を設定する必要があり、沈下力が不足する場合は側壁厚と作業室天井スラブ厚を増やしてケーソン重量を増加しなければ

ならない。

⑤ 部材厚相互間の調整

現行の各部材要素の構造計算モデルは、各部材要素を単体的にはりや板などとしてとりあつかっているため、各計算モデルの仮定が成立するように境界条件、すなわち部材厚相互間の関係を調整する必要がある。主な部材厚相互間の調整としては以下のようなものがある。

- ① 刃口基部厚 \geq 側壁厚
- ② 作業室天井スラブ厚 \geq 側壁厚
- ③ 側壁厚 \geq 隔壁厚
- ④ 側壁厚 $>$ パラペット厚

これらの部材相互間の調整は既往実績に基づいて定量的に関係づけるようにする。

⑥ 構造計算

構造計算により断面算定を行うとき、与断面としては沈下関係の照査および部材厚相互間の調整スクリーンを通過した値が初期値となる。純曲げ部材については与断面に対する鉄筋量の上限值以下で、応力度が許容値内におさまれば断面は決定する。許容値をこえる場合、断面は各部材厚で設定されたきざみ幅で増やす。曲げと軸力を受ける部材については、与断面に対し $\sigma_s = \sigma_{sa}$ としたときの必要鉄筋量と $\sigma_c = \sigma_{ca}$ としたときのそれとを比較し、鉄筋が圧縮力をカバーしている場合は断面を変更する。またせん断応力度が許容値をこえる場合、頂板以外の部材では腹鉄筋の使用例はまれであり、所要の配筋に対する施工性の低下を考慮してコンクリート断面を増やすこととした。

3) 隔壁枚数とその位置

隔壁枚数およびその位置はケーソン外かく寸法に応じて経験的に5~7mスパンで均等割りされているが、隔壁枚数とその位置を決定する場合はぎ装や構築の作業効率およびシャフト本数とその位置による掘削能率なども配慮する必要があり、このために以下の検討を行った。

① シャフト径(1.2m)に対し外側0.5m程度の内空を確保する必要がある。円形ケーソンの場合、自動設計の適用範囲内(最大 ϕ 10m)では十字形隔壁を設けると、ぎ装作業が困難となるため、円形ケーソンには隔壁を設けない。

② 小判形ケーソンの場合、短径寸法が小であるケーソンでは短径方向のシャフト設置余裕がほとんどえられないので長径方向の余裕をみこむ必要がある。長径方向の必要内空を3m以上とし、最小隔壁間隔を4.5mとした。

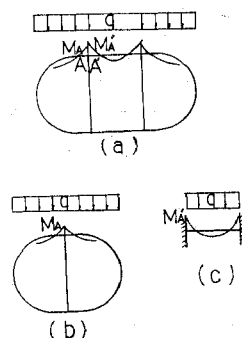
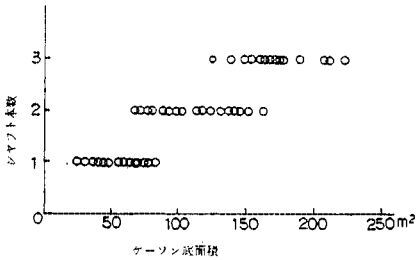
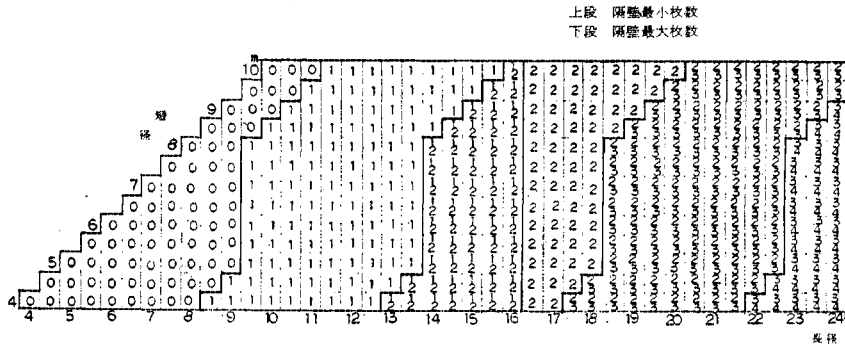


図-6

表一2 自動設計適用範囲と隔壁枚数



図一7 ケーソン底面積とシャフト本数 (施工実績)

また最大隔壁間隔は既往実績より 6~7m とし、隔壁を設ける区間は側壁の直線部としてこれらの条件を総合してケーソン外かく寸法と隔壁枚数との関係を表一2 に示すように関係づけ、これをファイル化した。

隔壁位置の決定は、側壁水平断面の計算において一方向偏荷重状態に対して隔壁に生じる曲げモーメントを可能な範囲内で最小にするように設置することを目的とし、近似解として図一6(a) に示す構造を図一6(b), (c) に示す構造に分解し、図一6(b) に対しては隔壁 1 枚のときの偏荷重状態に対して最小仕事の原理を用い、また隔壁間については両端固定ばりとして、それぞれ材端モーメント $M_A, M_{A'}$ を求め、前記諸条件のもとで $|M_A - M_{A'}|$ を最小にするように決定する。

4) シャフト本数とその位置

シャフト本数の多少は掘削能率を支配し、工費・工期に大きな影響をおよぼす。図一7 はケーソン底面積とシャフト本数との関係について調査した結果であるが、シャフト本数はケーソン底面積と関係していることがわかる。またシャフト本数が制約される他の要因としてはシャフト間の距離、およびシャフトと刃口までの距離が考えられ、人力掘削ではシャフトを中心として半径約 6m の範囲までは普通の掘削能率が保たれる。重複部分を考慮してシャフト間の離れは最大 10m 程度にするのが望ましいと判断される。

このような調査検討結果よりシャフト本数の決定アルゴリズムを以下のように設定した。

① 円形ケーソンの場合..... 1 本

② 小判形ケーソンの場合

- 底面積 (A) < 75 m² または隔壁なし..... 1 本
 - 75 m² ≤ A < 150 m² または隔壁 1 枚..... 2 本
 - 150 m² ≤ A または長径 ≥ 20m..... 3 本
- シャフト位置の決定については、シャフトとケーソン本体内面との離れを最小 0.5m は確保するという条件のもとで、各シャフトが受けもつ掘削面積が等しくなるよう配置する。

(3) 設計の省略化

本自動設計における設計変数、制約条件の数は最大の場合 94 である。これらの項目別内訳としては、設計震度・荷重関係 15、単位体積重量・許容応力度関係 12、地盤定数関係 34、レベル関係 9、橋脚寸法 4、刃口形状 5、ケーソン外かく寸法上・下限値その他 15 となっており、これらのアウトプットである構造寸法鉄筋諸元は約 70~100 程度となっている。このように多量な設計変数および制約条件を設定する過程では、設計者に設計・施工全般にわたる幅広い知識・経験が要求され、設計者の負担が多大となる。したがって設計の自動化により設計計算プロセスの省力化および迅速化だけでなく、設計変数・制約条件設定プロセスにおいても合理的に省力化することが望まれる。この場合、材料の単位体積重量・許容応力度関係をはじめ、従来標準的なものとして設定されてきた設計変数に関してはプログラム内に内生化し、入力項目から除外することができるが、荷重・地盤定数・レベル関係などの設計変数は上部工の種類、幅員、スパンまたは橋脚の高さ、重量、地盤条件、環境条件などがそのつど変化するので、これらの各項目についてはすべて入力する必要がある。

これらの設計変数の入力項目を減少させるための一方法として、荷重条件・地盤条件などのパターン化が考えられるが、そのためには膨大な量の基礎データが必要とされ、特に地盤条件については地域的な分類さえできていない現状を考慮すると、この方法によるアプローチは

困難であると考えられる。他のアプローチとして設計変数・制約条件とアウトプットである構造寸法・鉄筋諸元との対応を統計的に調べ、その感度分析により感度の鈍い設計変数については定数化などにより入力項目から除外し、感度の鋭い変数については十分な調査・検討を行ったうえで入力値を設定することにより、設計の省力化と合理化をはかりうる。

以上のような観点から、筆者らはまず第1段階としてケーソン外かく寸法を決定する安定計算式をより簡単な近似式で表現するための検討を行ったが、その概要を以下に述べる。

a) 計算モデルの簡易化

現行の「ケーソン指針」に基づく設計計算モデルをそのままの形で取り扱うことは、必要データ量が膨大となり、また解析技術上からもきわめて困難であるため、以下に述べる方法により計算モデルの簡易化を行い、設計変数の整理縮少をはかった。

① ケーソン基礎の設計における第1段階は、荷重・地盤条件などに対して、基礎としての安定解析によってケーソンの根入れ長、長径および短径寸法を決定することであり、各部分要素の断面と鉄筋諸元はこれらの関数として設定されるものと判断される。

② 現行の「ケーソン指針」の安定計算式はケーソン周面地盤の地層区分を最大3層まで解いているため、設計変数・制約条件の数は31となり、きわめて複雑である。そこで現行の「ケーソン指針」の安定計算式は池原・横山式³⁾の考え方の延長にあるものとして本式を準用する。

b) 設計変数の定式化

本項では設計変数おのおのの適用範囲を設定するとともに、調査結果をもとにして相互に関連する変数間の関係を定式化するための検討を行う。

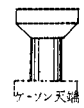
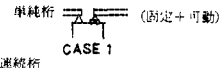
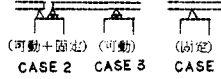
1) 外力 (N, H, M) の定式化

ケーソン天端に作用する外力は上部構造の種類、幅員およびスパンなどによって異なり、また橋脚の高さ、重量などによっても差異がある。また荷重状態は常時、地震時、風荷重および架設時などにわけられるが、一般には地震時における安定解析によりケーソンの外かく寸法が決定されるので、ここでは地震時についてのみ取り扱い、「土木構造物標準設計」⁴⁾に示される上・下部構造の範囲内で鉛直力 (N)、水平力 (H)、モーメント (M) の相互関係を表-3 および図-8 のように定式化した。

2) ケーソン寸法と重量の定式化

ケーソンの長径・短径寸法は 2. (2) a) 3) で定めた範囲内の値とし、また根入れ長 ≒ ケーソン長とみなし、 $10\text{ m} \leq (\text{ケーソン長}) \leq 30\text{ m}$ とした。完成時のケーソンの単位体積重量 (w) は既往実績によると $1.7 \sim 2.2\text{ t/m}^3$

表-3 上・下部構造の定式化

上 部 構 造	通用範囲	PC単純橋 幅員(m) 7, 10, 13 支間(m) 20~40 通三径間 幅員(m) 7, 10, 13.5 連続橋 支間(m) 20~60	通用範囲	幅員(m) 8, 12, 14 高さ(m) 5, 9, 13
	支点反力	おのおのの幅員支間に応じた支点反力は建設省「標準設計下部工編」より求め幅員別に反力範囲を設定した。	部形式	
下 部 構 造	支点の組合せ	 	寸法	各部分の寸法は建設省「土木構造物標準設計」より幅・高さに該当する値を求め、水深は高さの2/3と仮定し、水中部分については動水圧および浮力を考慮する。

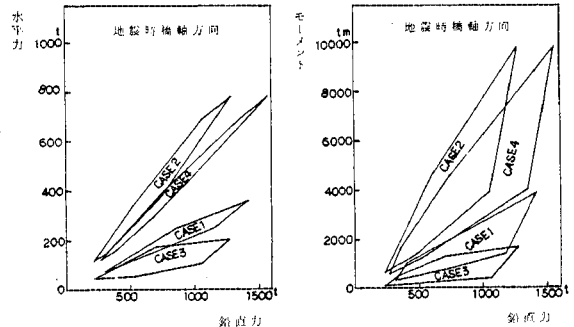


図-8 ケーソン天端に作用する外力の定式化

の範囲内にあり、これを処理して $w=2\text{ t/m}^3$ とした。

3) 地盤条件とレベル関係の定式化

設計地盤高、地下水位高はともにケーソン天端にあるものと仮定し、側面地盤は粘着力が0である土質とする。また土の水中単位体積重量は 1 t/m^3 とし、地盤反力係数比 ($\kappa=K_V/K_H$) は $1 \sim 10$ までの範囲内でとりうるものとした。

4) 最適化と設定した数式との関係

前記のようにモデルを簡易化し、設計変数を定式化すると安定計算における設計変数、制約条件および目的関数は以下ようになる。

① 設計変数

- N: 地震時鉛直力
- H_1, M_1 : 地震時橋軸方向水平力 およびモーメント
- H_2, M_2 : 地震時橋軸直角方向水平力 およびモーメント
- κ : 地盤反力係数比
- $K_{EP}=f(\phi)$: 地震時受働土圧係数
- q_a : 地震時許容鉛直支持力度
- l: ケーソン長

② 制約条件

$$P_i \leq P_{ai} \text{ (前面地盤の許容判定)} \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_i \leq Q_{ai} \text{ (底面地盤の許容判定)} \dots\dots\dots(6)$$

ここで添字 i は $i=1, 2$ であり、それぞれ橋軸方向、橋軸直角方向を表わす。

③ 目的関数

$2a, 2b$: ケーソンの短径, 長径

ただし底面積は最小とする。

地震時におけるケーソンの安定計算式を変形して制約条件式に代入すると、 $i=1, 2$ として

$$f_i = (a, b, l, N, H_i, M_i, \kappa, K_{EP}) \geq 0 \dots\dots(7)$$

$$g_i = (a, b, l, N, H_i, M_i, \kappa, q_{ai}) \geq 0 \dots\dots(8)$$

の計4式がえられるが、目的関数 a, b については高次の複雑な関係となり、このままでの取り扱いは上記変数間の相互関係を把握するには不適当である。したがってこのような関係式の複雑さは、剛体としての力のつり合い条件に起因するので、地盤反力度については次項に示す重回帰分析による近似式を導入することにした。なお重回帰式の各項の設定は主成分分析によるグループわけの結果をも参考にして行っている。

c) 重回帰分析による地盤反力度の重回帰式

ここでは 2. (3) b) で定式化した荷重状態のうち、上部構造が表-3 に示す P C 単純桁橋における地震時地盤反力度の重回帰式を例にとって述べると次のとおりである。

1) 重回帰式に用いた設計変数と底面形状

上部構造が単純桁の場合、ケーソン天端に作用する地震時の外力は橋軸方向、橋軸直角方向ともほぼ等しく、橋脚からの制約条件を無視すればケーソン形状は円形がもっとも経済的になるため、 $a=b$ とおいて重回帰式を求めた。なお重回帰に用いたデータは 252 ケースである。

2) 地盤反力度の重回帰式

地震時におけるケーソン最大前面地盤反力度 p_{max} の重回帰式は

$$p_{max} = \delta_1 + \delta_2 H / (bl) + \delta_3 H / (l^2) + \delta_4 M / (bl^2) \dots\dots\dots(9)$$

となり、回転中心深さ h は単重回帰式として

$$h = \delta_5 + \delta_6 l \dots\dots\dots(10)$$

また地震時最大前面地盤反力度 q_1 は次式で示される。

$$q_1 = \delta_7 + \delta_8 \kappa M / (bl^2) + \delta_9 N / (b^2) + \delta_{10} \kappa H / b \dots\dots(11)$$

ここで、 $\delta_1 \sim \delta_{10}$ は重回帰係数であり、95% 信頼区間、重相関係数 (R)、寄与率 (R^2)、自由度調整済みの重相関係数 (R^{*2}) および分散比 (F) については表-4 にまとめた。

地盤反力度の重回帰式を許容判定条件に代入することにより円形ケーソンの寸法を簡単に算出することができる。すなわち前面地盤については、許容判定条件

$$P_{max}/1.2 \leq p_a/1.1 \dots\dots\dots(12)$$

表-4

重回帰式	$P_{max} = \delta_1 + \delta_2 \frac{H}{bl} + \delta_3 \frac{H}{l^2} + \delta_4 \frac{M}{bl^2}$			
重回帰係数	$\delta_1 = -0.18852$	$\delta_2 = 2.3620$	$\delta_3 = -5.8626$	$\delta_4 = 1.5385$
95%信頼区間	± 0.20909	± 0.1599	± 0.4407	± 0.1678
$R = 0.97968$	$R^2 = 0.95978$	$R^{*2} = 0.95930$	$F = 1972.39$	
重回帰式	$q_1 = \delta_7 + \delta_8 \frac{\kappa M}{bl^2} + \delta_9 \frac{N}{b^2} + \delta_{10} \frac{\kappa H}{b}$			
重回帰係数	$\delta_7 = 18.992$	$\delta_8 = 2.1253$	$\delta_9 = 0.45374$	$\delta_{10} = 0.01839$
95%信頼区間	± 2.831	± 0.1427	± 0.0438	± 0.01169
$R = 0.96525$	$R^2 = 0.93171$	$R^{*2} = 0.93088$	$F = 1127.75$	

(ここで左辺の 1.2 は側面の分担分を考慮して低減する値、右辺の 1.1 は地震時安全率である)

を使用し、また受働土圧の計算から

$$P_a = (1/2) h K_{EP} \dots\dots\dots(13)$$

とおくと、式 (9), (10), (12), (13) より

$$b \geq \frac{\delta_2 H l + \delta_4 M}{l^2 \{ (1.2/2.2) K_{EP} (\delta_5 + \delta_6 l) - \delta_1 - \delta_3 H / l^2 \}} \dots\dots\dots(14)$$

となる。底面地盤についても同様にして次式がえられる。

$$b \geq \frac{d + \sqrt{d^2 + 4 \delta_9 N l^4 (q_a - \delta_7)}}{2 l^2 (q_a - \delta_7)}$$

ここに

$$d = \kappa (\delta_8 M + \delta_{10} H l^2) \dots\dots\dots(15)$$

3) 重回帰式の適用例

2) において導出した重回帰式に次の設計条件を適用した。

設計条件

- $N = 1420 \text{ t}$
- $M_1 = M_2 = 3800 \text{ tm}$
- $H_1 = H_2 = 350 \text{ t}$
- $\kappa = 6$
- $l = 10 \text{ m}$
- $K_{EP} = 2 (\phi = 17.5^\circ)$
- $q_a = 200 \text{ t/m}^2$

池原・横山式からケーソン寸法を求めると $2a = 2b = 9 \text{ m}$ となる。一方前記重回帰式よりケーソン寸法を求めると、前面地盤については $b \geq 4.1 \text{ m}$ 、底面地盤については $b \geq 3.8 \text{ m}$ となり、したがって重回帰式による推定では $2b \geq 8.2 \text{ m}$ となるが、自動設計のきざみ幅にあわせると $2a = 2b = 8.5 \text{ m}$ となり、池原・横山式から求めた解とほぼ一致する。

d) 構造諸元と設計変数との重回帰式による感度分析

2. (3) c) で述べた荷重状態以外についても、地盤反

力度の回帰式を求めてみたが、統計的には重相関係数が0.95以上のきわめてよい回帰式であることが判明した。しかし回帰式は各項の偏回帰係数に信頼区間の幅があり、設計条件から推定される地盤反力度にも変動範囲があるため、地盤反力度の回帰式と許容支持力度とを結びつけて設計条件からケーソン外かく寸法(2a, 2b)の関係式を導くと、a, bの変動範囲がかわり、その範囲が拡大するものと考えられる。すなわち地盤反力度の回帰式から外かく寸法を逆推定することは精度が悪くなる。しかしこの回帰式によると設計条件のケーソン構造寸法諸元に対する感度分析の第1段階として、設計条件の変動が外かく寸法にどれだけ影響するかを推定することができるため有効であると判断される。

より正確な構造諸元の回帰式を求めるには、現在の回帰式の整合範囲を広げる意味も含めて、設計条件を実際の設計で用いられている全範囲で変化させ、自動設計による累積設計を行い、より高度な回帰式を求める必要があると考えられる。

(4) 調査・試験データと設計条件

ケーソンの設計では土質調査・試験データの設計条件への入力過程がきわめて重要であり、これらのデータの読み誤りはケーソンの形状寸法の選択を誤らせることになる。「ケーソン指針」および「道路橋下部構造設計指針(調査および設計一般篇)」などでは土質調査・試験結果に基づく地盤定数設定のための各種推定法を示しているが、最終的には設計者の判断に依存しているのが実情である。設計条件設定の際、問題となる項目には次のようなものがある。

- ① 支持層の選定
- ② 先掘深さとケーソン天端高
- ③ 耐震設計地盤高の設定
- ④ 底面地盤の鉛直方向許容支持力
- ⑤ ケーソン天端の変位量
- ⑥ 地層区分と地盤反力係数
- ⑦ 周面摩擦力の推定

これらの各項目は土質柱状図や土質試験結果などの資料をもとにして設計者の知識・経験が加味されて設定されており、そのプロセスは部分的にはアルゴリズムが存在するが、全体として整合性のあるアルゴリズムはいまだに確立されていない。

また基礎の設計では設計条件の中に不確実な要素をも包含するために、設計計算結果との照合で不確実な設計条件を再検討するというフィードバックのプロセスが存在する。したがって自動設計においても、調査・試験データの設計条件への入力過程および設計計算結果に対してチェックシステムが当然必要となる。しかし現段階で

チェックシステムを合理的に確立するためには以下のような問題点が未解決である。すなわち

① 土質調査・試験結果の設計条件への移行にアルゴリズムが確立していない。たとえば支持層の選定、地層区分など。

② 各種推定式による算定値と経験的な設定値との間に連続性がない場合がある。たとえば底面地盤の鉛直方向許容支持力度の算定値は常識で考えられる値の数倍になることが多い。

③ 設計条件間の相互関係および各設計条件のケーソン構造寸法諸元に対する感度が不明確である。また既往実績に対する調査が不十分であるため資料にとぼしい。などであり、チェックシステムの自動化のためには既往の実績に対する十分な調査と基礎工学の進歩が前提となる。したがって現段階では自動設計システムの管理・運営のために基礎構造の専門家によるチェック機関に類するものを設置し、現場に合致した設計を行う必要があるものと考えられる。

3. 自動設計プログラム概要

(1) プログラムサイズ

自動設計プログラムは言語として ALGOL を使用しており、設計計算で 8500 ステップ、図化で 25000 ステップにもおよび、48 ビット、99 K ワードの大型電子計算機(CDC 6600)を使用している。

演算時間は設計計算で 2~5 分、図化では図面 1 枚あたり 15~20 分程度を要する。

(2) 設計プロセス

本自動設計の設計計算アルゴリズムの概略フローチャートは図-9 に示すとおりであるが、以下この処理過程における処理概要を述べる。

1) 入力の方法

設計震度・荷重関係、地盤定数、レベル関係、ケーソン外かく寸法下限値などの入力と、ファイル化された基本定数および各種推定法の選択により計算を開始する。

2) 外かく寸法と各部材要素の初期値設定

外かく寸法が下限値において設計不能の場合、3.(3)a)において述べる最適ケーソン選定手順により自動的に外かく寸法を設定する。各部材要素の初期値はファイル化されている。

3) 隔壁枚数とその位置の設定

外かく寸法が設定されると隔壁枚数およびその位置が決定される。なお隔壁枚数は入力で選択できる。

4) 安定計算

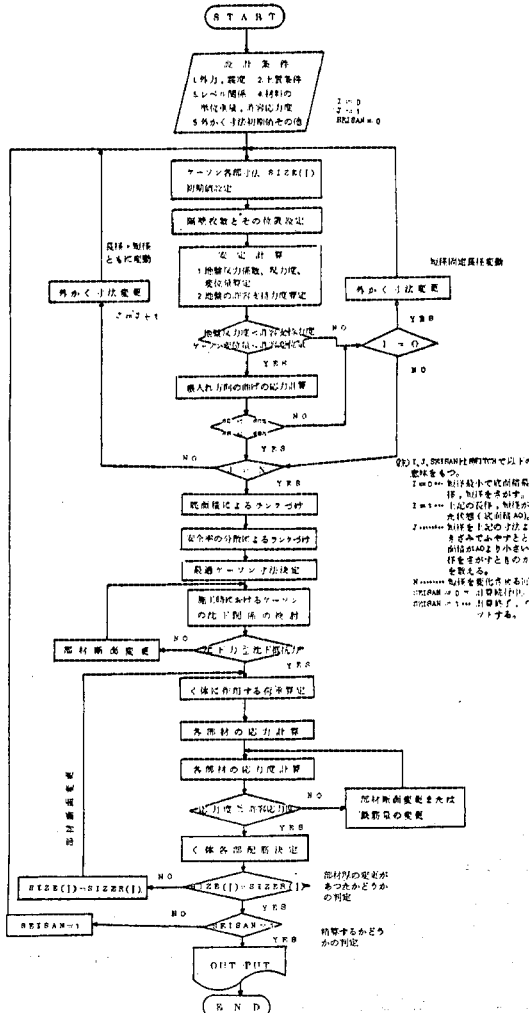


図-9 概略フローチャート

入力された地盤定数から地盤反力度，変位量および許容支持力度を算定し，剛体基礎としての安定解析を行う。底面地盤の許容支持力度は静学的公式による算定値が過大に評価される場合があるので，入力でその上限値を設定する。また安定計算と同時にケーソンの根入れ方向の曲げに対する検討を行い，ケーソンの断面剛性が不足するような形状はあらかじめ除外して演算時間の短縮をはかっている。

5) 最適ケーソンの選定

安定計算を満足するケーソンを底面積の小なものからランクづけし，次に安定計算における安全率の分散を調べ最適ケーソンを決定する。

6) ケーソンの沈下関係の照査

ケーソンの施工時の沈下力と沈下抵抗力との比較から，沈下力が不足する場合は側壁厚または作業室天井スラブ厚をふやす。ここで沈下用荷重は水とし，ケーソン天端まで湛水可能として沈下関係が満足されているかを

照査する。

7) 各部材の応力計算

各部材に作用する荷重は入力により自動的に計算処理され，施工時・常時・地震時について応力解析を行う。側壁部の応力計算と応力度照査はケーソンの各ロッドごとについて行う。

8) 設計の収束判定

一般にはある部材要素の断面変更は他の部材要素の断面算定に影響するが，各部材要素の構造計算モデルの相互関係を追跡して各部材要素の設計計算の順序づけを行い，経済断面の設計を迅速に行うようにした。また設計の収束判定は前回計算値と今回計算値が同一である場合に設計の完了とみなした。

9) 鉄筋量の算定

各部材断面に対し，ファイル化された配筋パターンより，鉄筋量を最小にする配筋を選択する。このとき相互に関連する鉄筋については鉄筋径や鉄筋間隔の調整を行い，構造全体の鉄筋量と配筋方法を決定する。

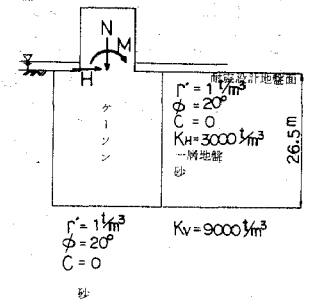
10) 出力

出力は設計計算書一式（約20～30ページ），シャフト本数とその位置および最適ケーソン以外の設計可能なケーソン群などに関する情報がえられ，図面の種類は次のようになっている。

- ① 一般寸法図
- ② 配筋図および鉄筋加工図
- ③ 鉄筋数量表
- ④ 刃口金物図
- ⑤ 理論沈下関係図（土質柱状図も含む）

(3) 自動設計成果と既往設計結果との比較

自動設計結果の検証のため，既往設計例との比較を次のとおり行った。すなわち主要な設計条件は図-10に示すとおりであるが，自動設計では橋脚寸法（16×2.7mの小判形）と施工余裕を考慮して長径 ≥ 18m，短径 ≥ 4.5mの小判形断面のケーソンの条件をつけて最適ケーソンを求める。



地震時ケーソン天端に使用する外力		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N t	2607.1	2607.1
H t	1400	669.3
M t m	13836	6837.8

図-10 主要設計条件

a) 最適ケーソン選定手順説明

図-11に基づいて最適ケーソンの選定手順の説明を

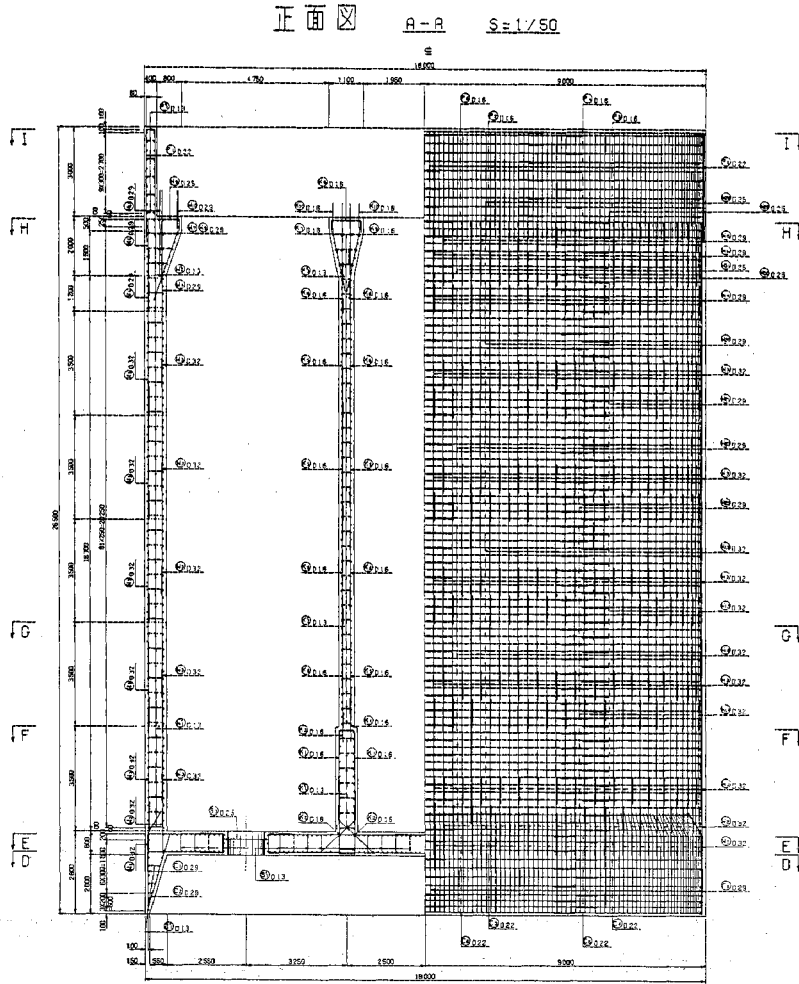


図-13

4. ま と め

電子計算機が土木設計に導入されることになった動機はその高速処理能力のゆえであった。そして従来、手のつけようもなかった大量な計算や資料を処理することにより、未知の知識体系を探ることも可能となったのである。しかし電子計算機の役割はそれ自身の能力による役割にとどまらず、電子計算するために要求される論理性が、われわれ人間の考え方に影響を与えうるところにある。つまり電算化するためには何らかのモデルを与えなければならない。そして、モデルを与えるためには何らかの評価基準を持たなければならない。こうして人間が設定しなければならないものを機械が追い詰めてくることになるのである。したがって電算化する場合に要求される論理性が、従来われわれ人間が見逃していた設計過程における評価要素の明確化を要求することに

なる。

本研究も不確定要素の多いニューマチックケースン基礎の自動設計にあたって、筆者らはその合理化をはかることを目的として次の成果をえた。

(1) 最適設計のための設計目標を経済性および基礎としての安定性の2つの要因で定式化した。

(2) 従来設計者個人の経験や感に依存してきた設計プロセスのパーツに対して、既往実績に基づく検討を加え、また施工を十分配慮して各パーツの定量化および技術化を行い、トータルな設計アルゴリズムの基準化をはかった。

(3) 自動設計プログラム使用による自動設計結果と既往設計結果との比較を行ったが、ケースンの規模および主要な材料は約10~30%低減しており、自動設計により経済的な設計が可能となることが判明した。

一般に基礎構造物の設計では、調査・試験データの設計条件への過程およびアウトプットに対してチェックシ

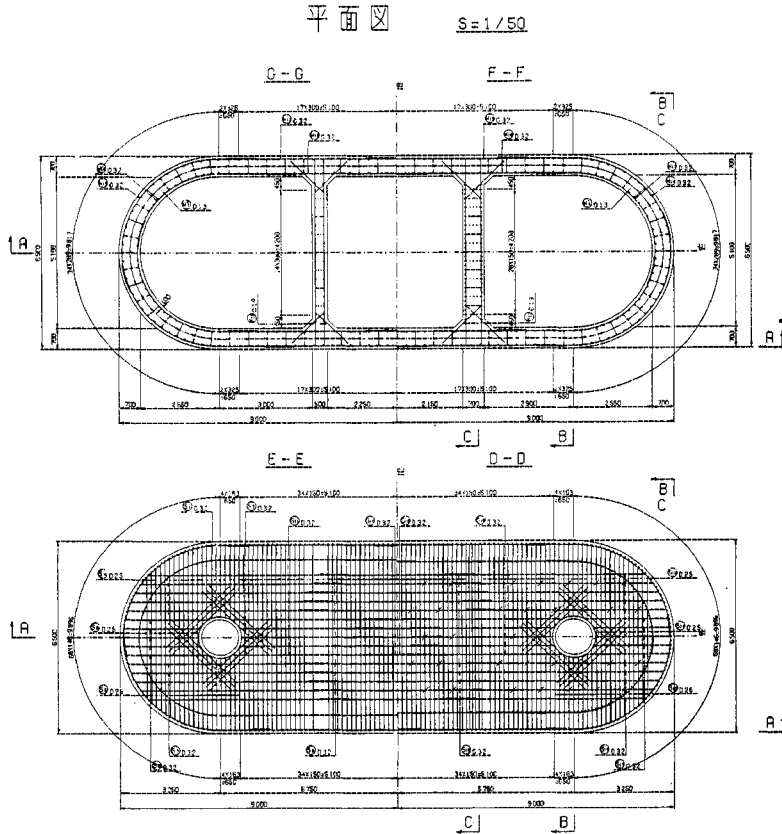


図-14

システムが必要とされているが、チェックシステムの自動化のためには既往実績に対する広汎な調査および今後の研究が望まれる。

また現在、基礎構造および上・下部構造はそれぞれ単独に設計されており、このたびの研究も上・下部構造については与条件として扱っている。近年主として河川管理上の制約からケーソン工事における止水壁高が増大する傾向にあり、ために安全性の観点からケーソンと橋脚を一体としたピアケーソンが出現しているが、筆者らはこれらの自動設計も続けて行う予定である。

なお、本自動設計システムの開発主体は建設省土木研究所であり、同所に設けられた「ニューマチックケーソン自動設計委員会」(委員長 吉田 巖 48年度および浅間達雄 49年度)によって本システムは承認されたもので、委員諸氏には貴重なご意見、ご指導をたまわ

り、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会編：土木計画学の領域と構成，土木計画学シリーズⅡ，pp. 115.
- 2) 労働省令：高気圧障害防止規則。
- 3) 池原・横山：水平力をうけた井筒の安定計算について，土木学会誌，Vol. 38, No. 12, pp. 19~23 (1953).
- 4) 建設省：建設省制定土木構造物標準設計利用の手引，pp. 64~88 (1975).
- 5) 岩松：土木設計と電子計算，橋梁，Vol. 8, No. 11, pp. 25~26 (1972).

そのほか一般的な参考文献として以下のものを使用した。
○日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・ケーソン基礎の設計篇など一連の設計指針。

- 土木学会編：土木製図基準，土木学会。
- Bolch, B.W. and Huang, C.J. (中村慶一 訳)：応用多変量解析，森北出版 (1976)。

(1976.6.29・受付)