土木研究所報告

第149号

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 …… 岩松幸雄…(1)
駒田敬一
工藤真之助

テンターゲートの脚柱の立体的挙動に関する研究 …… 柴田　功…(65)
斉藤孝三

標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の
評価に関する研究 …… 橋本　健…(115)

流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究(I)…… 岩松幸雄…(129)
関　正和
吉川勝秀
三好逸二

昭和52年9月

建設省土木研究所

土木研究所報告
第149号　1977年9月

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

岩松幸雄 *
駒田敬一 **
工藤真之助 ***

Study on Rationalization of Automatic Design of Pneumatic Caisson Foundation

by Sachio Iwamatsu
Keiichi Komada
Sinnosuke Kudou

Synnopsis:

The design of pneumatic caisson must be done on the basis not only of the results of structural calculation, but also of the results of surveys and experiments, taking into consideration design conditions, adaptability of the design model for a rigid foundation, and relationship between stress and strain due to construction method and process.

This study aims at rationalizing and systematizing parts of the design formerly depended on personal experience or skill for the design of a pneumatic caisson foundation.

One of the results is that new subjects were proposed and various analytical methods were developed.

As the construction of rigorous design model of caisson foundation is quite difficult at present, the verification with actual construction records and past design data were greatly proceeded.

Moreover, for the development of the program applicable for the wide range of design conditions, lots of input variables are necessary.

To avoid this defect, the Principle Component Analysis was employed and the some valiables were built in the program.

Key words.　Pneumatic caisson, automatic design, optimum design, regression analysis, regression equation.

要　旨

ニューマチックケーソン基礎の設計は，単なる構造計算のみでなく，土質をはじめとする調査・試験結果から設計条件へのうつしかえ，剛体基礎としての安定性に関するモデルの適応性，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の関係などを総合的に検討して判断することが要求される。本研究は，昭和48～49年度に作業を行ったニューマチックケーソン基礎の設計の自動化に際して，これら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試みたものであり，一つの結論は新しい課題を提供することとなり，分析にもさまざまな手法が展開されることになったがニューマチックケーソン基礎の設計自体が現在のところ完全な理論モデルでの全体構築は困難であるところから，常に既往設計との照合をこころがけた。また，

* システム課長　** 本四公団工務第一課長（前基礎研究室長）　*** システム課技術基準係長

プログラムの汎用性を高めようとすれば，とかくインプットデータが多くなりがちである。
そこで，主成分分析によってデータを内生化することで対処した。

キーワード（ニューマチックケーソン，自動設計，最適設計，回帰分析，回帰式）

目　　次

1. まえがき …… (2)
2. 設計アルゴリズムの合理化 …… (2)
〔1〕評価基準の設定 …… (3)
（1）経済性に関する評価の検討 …… (3)
（2）ケーソン基礎の力学的安定性に関する検討 …… (4)
〔2〕設計アルゴリズムの基準化 …… (13)
（1）適用範囲に関する検討 …… (13)
（2）各設計諸元決定アルゴリズムに関する検討 …… (14)
（3）設計基準との整合 …… (20)
〔3〕設計の省力化 …… (20)
（1）計算モデルの簡易化 …… (20)
（2）設計変数の定式化 …… (23)
（3）安定計算の数式上からの検討 …… (25)
（4）重回帰分析による地盤反力度の回帰式 …… (26)
（5）回帰式を用いた構造諸元 a，b の検討 …… (33)
（6）構造諸元と設計変数との回帰式による感度分析 …… (36)
〔4〕調査，試験データと設計条件 …… (36)
3. 自動設計プログラムの概要 …… (37)
〔1〕プログラムの適用範囲とその規模 …… (37)
〔2〕自動設計の成果と既往設計結果との比較 …… (38)
〔3〕48年開発プログラムの問題点とその処理 …… (42)
4. あとがき …… (42)

1　まえがき

建設省では，土木構造物の標準化業務として，設計頻度の高い構造物に対する標準設計の制定とともに，設計の自動化を推進している。特に，設計の自動化については，標準設計に集録されていない設計条件に対して利用できるもの（ただし，標準設計の設計範囲内とする）と，設計条件が複雑なため標準設計として集録することが妥当でないことから，自動設計プログラムにとどめるものとについて開発を進めている。

これまでに開発した自動設計プログラムは，ボックスカルバート（一連，二連），擁壁（重力式，片持梁式，控え壁式），橋梁下部構造物として橋台（重力式，逆T式，控え壁式），橋脚（小判柱，円形柱によるT型橋脚），ニューマチックケーソン基礎，オープンケーソン基礎（井筒基礎），くい（既製ぐい使用）基礎，上部構造物としてポストテンション方式ＰＣ単純T桁橋，プレテンション方式ＰＣ単純T桁橋，プレテンション方式ＰＣ単純中空床版橋，鉄筋コンクリート単純床版橋，活荷重合成および非合成鋼桁橋，河川構造物として樋門・樋管など多くを数える。

本報告は，これらのうち昭和48年度から49年度にかけて作業を行ったニューマチックケーソン基礎の自動設計プログラムの開発に際して検討した，設計アルゴリズムの合理化について述べたものであり，これまで手計算によっていた設計を，電子計算に移行させるための設計アルゴリズムの基準化，人間のようにひらめきのないことから生ずる設計成果と施工性との不整合に対する処理方法，最適設計にするための評価基準の選定，自動設計の設計成果と既往設計との比較検討等，自動設計プログラムの開発を行う場合の特異点を中心に触れてみた。

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編」（日本道路協会－以下「ケーソン指針」と呼ぶ）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，設計アルゴリズムの合理化のために次の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　設計手順の省力化の検討

④　調査，試験データによる設計条件設定の検討

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

ケーソン基礎の設計成果の評価要因は，工事費を主体とする経済性，対応モデルによる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を述べる。

（1）経済性に関する評価の検討

ケーソン基礎の工事費としては，大きく分けてケーソンの構築および掘削沈下関係の直接工事費と，桟橋工，築島工，機械・電気設備および共通仮設費などの間接工事費に分類される。これらのうち間接工事費は，ケーソン沈設位置における地盤条件や施工条件などにより大きな変動があり，経済性を検討する場合間接工事費を包含したものを比較するのは極めて困難をともなう。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）は構築工事費（P_1）と掘削沈下工事費（P_2）に含まれる各工程の工事単価（C_i および C_j）および数量（x_i および x_j）の積の総和であり，

$$\left.\begin{aligned} P_r &= P_1 + P_2 \\ P_1 &= \Sigma(C_i \cdot x_i) \\ P_2 &= \Sigma(C_j \cdot C_j) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

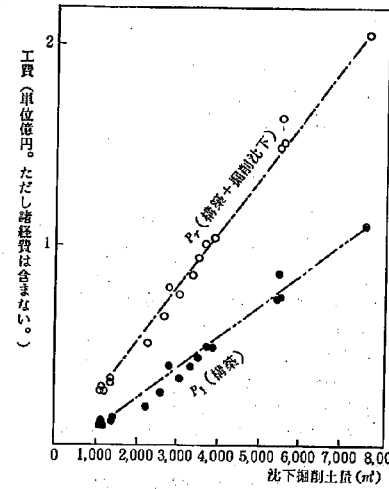
で表わされる。

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，ケーソン基礎の掘削土量と P_r の間には図－1に示すようにほぼ直接的な関係がみられる。

したがって　P_r は

$$P_r = \alpha \times (\text{掘削土量}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

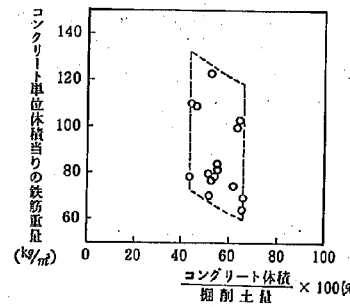
で表わすことができ，ケーソン基礎の経済性を有効に評価できる尺度は掘削土量であるといえる。図－1において P_1 と P_2 の比はほぼ1：1程度となっているが，これは P_2 にはケーソンの据えつけのための地盤造成や施工に関連する機械設備費および機械損料などを含めていないからであり，これらの工事費を考慮に入れると，P_1 と P_2 の比は約3：7から4：6程度になる。また，図－1より掘削土量と構築工事費の関係は，細部では多少の変動がみられるものの，ほぼ正比例しているといえる。この変動は，従来ケーソン基礎を設計する場合，ケーソンの外形寸法（長径，短径および躯体長）が決定されると，各部材の断面寸法はケーソン



図－1　沈下掘削土量と工費

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よって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加は使用鉄筋量の減少，体積の減少は使用鉄筋量の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単位体積当りの使用鉄筋重量の関係を調査してみたが，図－2に示すように同一条件下でも単位使用鉄筋量にかなりの変動がみられ，単位使用鉄筋量の大小がある程度構築工事費に反映しているといえる。

一般的にいって，ケーソンの外形寸法の増減は構築工事に正比例するので，ケーソンの立体形状が特殊な



図－2　主要数量関係

ものでない限り，掘削土量と構築工事費はほぼ正比例するといってよい。

以上のことから経済性評価の1つの目的変数として掘削土量を考え，設定された範囲内でこの値を最少にすれば経済的であるといえる。

ケーソン基礎の掘削土量は一般的には

$$V_a \fallingdotseq A \cdot \ell \quad \cdots\cdots (3)$$

ここに　V_a：掘削土量(m^3)

A：ケーソン底面積(m^2)

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ことになる。また，ケーソンの根入れ長は，安定計算によって決定される場合はまれであり，一般には，設計者がケーソンをどの地層で支持させるかで決定される。したがって，ケーソン基礎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。

(2) ケーソン基礎の力学的安定性に関する検討

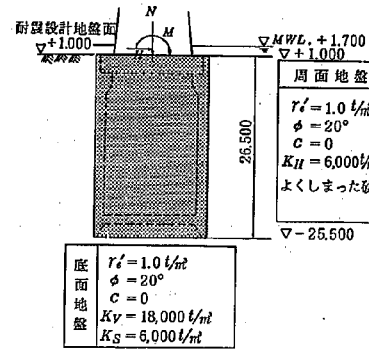
ケーソン基礎の設計においては，ケーソンの断面形状および外形寸法の選定が重要事項の一つであり，これら形状寸法の最終決定は，一般に安定計算の結果による場合が多い。

ケーソン基礎の安定性は，各外力状態に対して底面地盤および前面地盤の安全率が1以上であり，かつケーソン天端の変位量が許容変位量以下という条件を満足する必要がある。しかしながら，ケーソン天端の変位量は上部構造からの制約を受けるので，この値を固定値と考えるとすれば，ケーソン基礎の力学的安定性の評価基準としては，底面地盤と前面地盤に対する安全率と考えることができ，本節ではこれらについて検討を行っている。

(1) 地盤反力度の変化について

まず，ケーソン基礎の地盤反力度の変化を把握するために，図－3に示す既往設計例の設計条件を用いて，種々の形状に対する最大底面地盤反力度および最大前面地盤反力度を，橋軸方向，橋軸直角方向について求めてみると，図－4～図－7のようになる。なお，設計条件の橋脚からの制約条件を満足する自動設計結果は，18 m×6.5 mであったが，ここでは，橋脚からの制約条件を無視して，底面積が100 m^2～110 m^2となる長径，短径について安定計算を行ない，各寸法に対する最大地盤反力度を求めた。

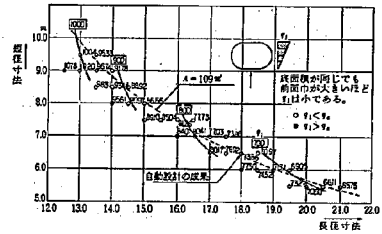
したがって，図－4～図－7から推論すると，この例におけるケーソンの形状寸法は，底面地盤反力度によって決定されており，地盤反力度の変化については



地震時ケーソン天端に作用する荷重		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N^t	2,607	2,607
H^t	1,400	669
M^{tm}	13,836	6,838

水平震度＝0.25
鉛直震度＝0
ピアからの制約条件
長径≧18.0 m　短径≧4.5 m

図－3　設計条件



図－4　ケーソン形状と最大底面地盤反力度（橋軸方向）

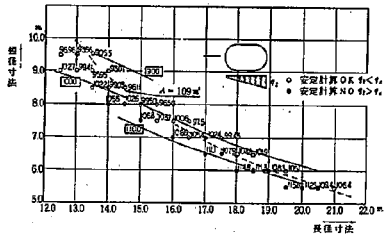
以下のことが言える。

イ）底面地盤反力度の変化

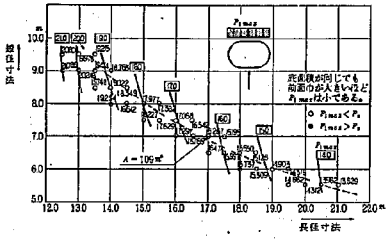
ケーソン底面積が同一であれば，前面幅が大きい方が底面地盤反力度は小さくなっており，橋軸方向の変化（65 t/m^2～100 t/m^2）にくらべて，橋軸直角方向の変化（110 t/m^2～90 t/m^2）は小さい。

ロ）前面地盤反力度の変化

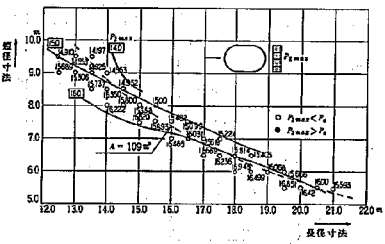
橋軸方向の変化（14 t/m^2～21 t/m^2）にくらべて，橋



図－5　ケーソン形状と最大底面地盤反力度（橋軸直角方向）



図－6　ケーソン形状と最大前面地盤反力度（橋軸方向）



図－7　ケーソン形状と最大前面地盤反力度（橋軸直角方向）

軸直角方向の変化（16 t/m² ～14 t/m²）は小さい。

また，橋軸方向の底面地盤反力度と前面地盤反力度の変化の様相は類似しているが，橋軸直角方向のそれらの様相は著しい変化がみられる。

(2) 橋軸方向と橋軸直角方向の地盤反力度の割合について

つぎに，橋軸方向と橋軸直角方向の地盤反力度の割合を，底面地盤反力度と前面地盤反力度について求めてみる。

イ）底面地盤反力度

q_1：橋軸方向荷重による最大底面地盤反力度

q_2：橋軸直角方向による最大底面地盤反力度

q_a：許容鉛直支持力度

とした場合

$$S_V=\frac{q_1/q_a}{q_2/q_a}$$

を底面地盤両方向の安全率を示す指標とすると，図－8に示すように短径（奥行き）が大きくなるほど，S_Vの値は1に近づき両方向の反力度のばらつきは小さくなる。

ロ）前面地盤反力度

P_{1max}：橋軸方向荷重による最大前面地盤反力度

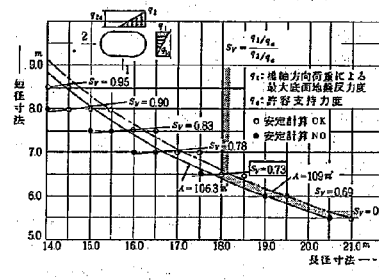
P_{2max}：橋軸直角方向による最大前面地盤反力度

P_a　：許容水平支持力度

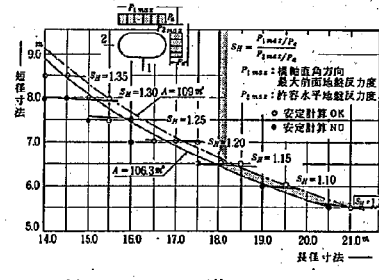
とした場合

$$S_H=\frac{P_{1max}/P_a}{P_{2max}/P_a}$$

を前面地盤の両方向の安全率を示す指標とすると，図－9に示すように長径（前面幅）を大きくするほ



図－8　ケーソン形状とS_Vとの関係



図－9　ケーソン形状とS_Hとの関係

ど，S_H の値は1に近づき両方向の反力度のばらつきは小さくなる。

以上から底面積をほぼ一定とした場合，$S_V \to 1$ にする方向と $S_H \to 1$ にする方向とが相反することとなり，どちらを重視するかでケーソンの形状は異なる。しかし，ケーソンは本来堅固な支持地盤上に据えつけ，底面地盤で荷重を受け持たせるのが合理的であることを考えると，$S_V \to 1$ の方向を考慮する方が好ましいと考えられる。

(3) 安定計算上の安全率に対する考え方について

安定計算を満足する底面積最小 (A_0) のケーソン基礎に対して，底面積 A がほとんど変わることなく安定計算を満足するケーソン基礎が存在するとすれば，それら複数個のケーソン基礎を何らかの基準で評価し，ランクづける方法を考えなければならない。安定計算のみに着目すれば，ケーソン底面積が等しい場合，安全率を評価の基準におくのが合理的であると思われ，安全率としては前述のように，

底面地盤に対して $\begin{cases} \text{橋軸方向} (S_{V1}) \\ \text{橋軸直角方向} (S_{V2}) \end{cases}$

前面地盤に対して $\begin{cases} \text{橋軸方向} (S_{H1}) \\ \text{橋軸直角方向} (S_{H2}) \end{cases}$

の4要素があり，これら4要素の評価方法により異なる評価基準が設定可能である。

したがって，以下に示す3通りの評価方法を考え，既往設計例に適用し検討を行った。なお，S =許容支持力度／反力度を意味し，地盤別，方向別に求まる安全率である。

① 安全率の和を最大にする考え方

前記安全率の4要素 ($S_{V1}, S_{V2}, S_{H1}, S_{H2}$) にウエイトづけすることは困難であるので，すべての要素を同等に取り扱うものとすると，4要素の算術和 ΣS がケーソン基礎全体の安全率の指標とみなせる。この考え方は4要素の変化の傾向が同じの場合に適用できる。

② 安全率の最小値を最大にする考え方

前記各要素の安全率のうち他の3要素に比べてある一つの要素が小さいとき，特にその要素の安全率を重視する必要がある。すなわち，このような場合安全率の最も小さい要素がケーソン基礎の全体的な安全率とみなせる。

今，2組のケーソン基礎の安全率（前記4要素）を

S_1 =（3.01, 4.02, 1.59, 3.11）

S_2 =（3.47, 3.80, 1.89, 3.08）

とすると，$_{min}S_1 = 1.59 < {}_{min}S_2 = 1.89$ であるから，評価のランクは S_2 を上位におくという方法である。

③ 安全率の分散を最小にする考え方

底面積一定でケーソン形状が変化するとき，安全率 S =（$S_{V1}, S_{V2}, S_{H1}, S_{H2}$）の変化の様相は極めて複雑である。

したがって，各要素を均等化させるためには統計的取り扱いをする必要がある。

すなわち，

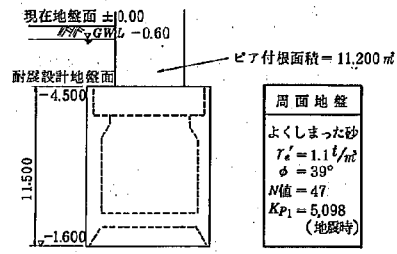
$$\bar{S} = \frac{\Sigma S}{4} = \frac{1}{4}(S_{V1}+S_{V2}+S_{H1}+S_{H2}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

とすると，安全率各々は同等の意味をもつものとして，分散は，

$$\sigma^2 = \frac{1}{4}\left\{(S_{V1}-\bar{S})^2+(S_{V2}-\bar{S})^2+(S_{H1}-\bar{S})^2 +(S_{H2}-\bar{S})^2\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

であるから，σ^2 が最小（σ が最小）なケーソン基礎を評価の基準と考える方法である。

設計例－(1)の設計条件は，図－10のとおりであり，それぞれの評価方法に対する結果を図－11, 12および表－1～表－4に示す。



地震時ケーソン天端に作用する荷重		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N t	1,050	1,050
H t	460	180
M tm	4,700	2,100

水平震度＝0.17
鉛直震度＝0
ピアからの制約条件
長径≧8.0 m　短径≧4.0 m

図－10　設計条件（設計例－1）

表－1　等面積ライン 22.5㎡ に対する評価方法別計算値（設計例－1）

（22.5 × 0.975 ～ 22.5 × 1.025）

ケーソン寸法	面積㎡	ΣS	順位	$_{min}S$	順位	$4\sigma^2$	順位
5.5×5.0	22.135	10.53 (0.4757)	1	1.34	3	3.010	3
6.5×4.0	22.566	10.55 (0.4675)	3	1.52	1	2.360	1
6.0×4.5	22.654	10.60 (0.4679)	2	1.43	2	2.499	2

表－2　等面積ライン 24.5㎡ に対する評価方法別計算値（設計例－1）

（24.5 × 0.975 ～ 24.5 × 1.025）

ケーソン寸法	面積㎡	ΣS	順位	$_{min}S$	順位	$4\sigma^2$	順位
7.0×4.0	24.566	11.08 (0.5410)	2	1.64	1	2.039	1
6.0×5.0	24.635	11.14 (0.4522)	1	1.46	3	3.012	3
6.5×4.5	24.904	11.16 (0.4481)	3	1.56	2	2.479	2

表－3　等面積ライン 27㎡ に対する評価方法別計算値（設計例－1）

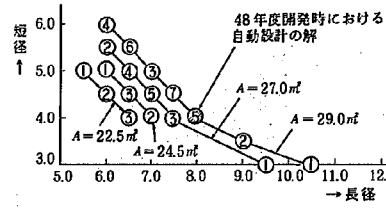
（27.0 × 0.975 ～ 27.0 × 1.025）

ケーソン寸法	面積㎡	ΣS	順位	$_{min}S$	順位	$4\sigma^2$	順位
6.0×5.5	26.508	12.29 (0.4636)	2	1.50	5	3.664	5
7.5×4.0	26.566	11.66 (0.4397)	3	1.77	2	2.052	2
9.5×3.0	26.569	12.39 (0.4663)	1	1.14	1	1.553	1
6.5×5.0	27.135	11.73 (0.4323)	4	1.59	4	3.022	4
7.0×4.5	27.154	11.72 (0.4316)	5	1.68	3	2.548	3

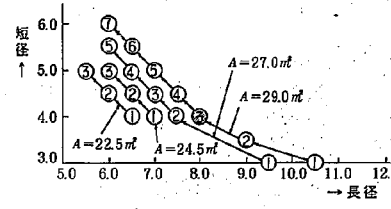
表－4　等面積ライン 29㎡ に対する評価方法別計算値（設計例－1）

（29 × 0.975 ～ 29 × 1.025）

ケーソン寸法	面積㎡	ΣS	順位	$_{min}S$	順位	$4\sigma^2$	順位
6.0×6.0	28.274	12.14 (0.4294)	4	1.53	7	4.182	7
8.0×4.0	28.566	12.24 (0.4285)	5	1.89	3	2.085	3
9.0×3.5	28.871	12.66 (0.4385)	2	2.08	2	1.783	2
6.5×5.5	29.258	12.29 (0.4201)	6	1.63	6	3.601	6
7.5×4.5	29.404	12.31 (0.4187)	7	1.81	4	2.500	4
10.5×3.0	29.569	13.58 (0.4593)	1	2.37	1	1.626	1
7.0×5.0	29.635	12.94 (0.4366)	3	1.72	5	3.100	5



図－11　①ΣS 最大によるランクづけ



図－12　②最小安全率最大によるランクづけ
（③σ^2 によるランクづけも同じ）
（設計例－1）

また，設計例－(2)の設計条件は，前述の図－3によるものとし，同様に結果を示すと図－13～図－15および表－5～表－7のとおりとなる。

以上の結果をもとに，それぞれの評価方法に対して比較検討を行えば，次のような事項が抽出できる。

① 安全率の和（ΣS）を最大にする考え方

④ 安全率の小さい要素をさらに小さくした方が ΣS は大きくなる場合が生じる。

ⓒ ランクづけが不規則になる。すなわち，好ましいケーソン形状比が不規則に変動する場合が生じる。

したがって，ΣS を最大とする考え方は，安全率の評価基準としては好ましくないものと判断される。

② 安全率の最小値（$_{min}S$）を最大にする考え方

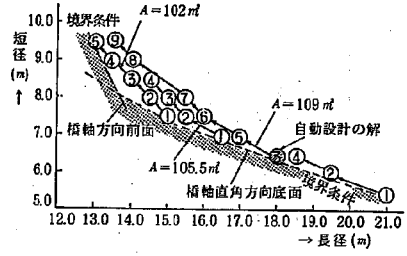
ランクづけに規則性がみられる。すなわち，好ましいケーソン形状比は底面積が多少変化してもそれほど変化しない。

③ 安全率の分散を最小にする考え方

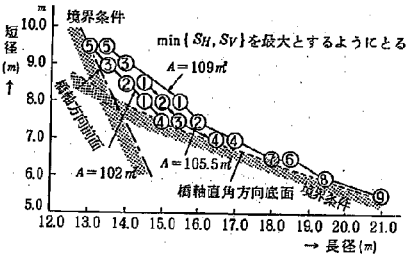
②と類似した規則性がみられる。

そこで，つぎに②と③の方法について比較考察してみる。

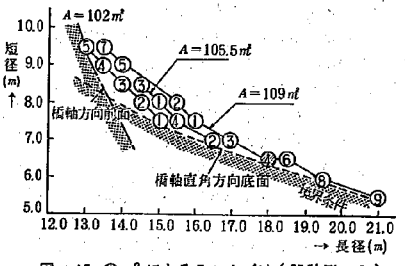
一般的な設計例では，ケーソン形状のとりうる範囲は橋脚寸法などにより制約を受けるが，地盤条件が悪い場合は，橋脚寸法にくらべてケーソンは大きくなる



図－13 ①ΣS 最大によるランクづけ（設計例－2）



図－14 ②最小安全率最大によるランクづけ（設計例－2）



図－15 ③σ^2 によるランクづけ（設計例－2）

ため，ケーソン形状のとりうる範囲も大きくなる。このような場合，②の最小安全率の最大化をはかることは，工学的に意味をもつ考え方ではあるが，各安全率（$S_{V1}, S_{V2}, S_{H1}, S_{H2}$）の信頼度あるいは重みは，各設計条件すなわち地盤条件によって異なるものであり，評価基準として選択した安全率が信頼度の低い場合であり，重要度の低い場合にはその意味も損なわれ，②を採用するのは少し問題が残る。そこで現段階では，力学的には許容抵抗力に見合った反力の分担を行うことが望ましく，安全率は平均化されている方が好ましい。

表－5　等面積ライン　102㎡に対する評価方法別計算値（設計例－2）

ケーソン寸法	面積㎡	ΣS	順位	minS	順位	4σ²	順位
15.0×7.5	100.429	4.57 (0.0455)	1	1.00	4	0.0633	1
14.5×8.0	102.145	4.60 (0.0450)	2	1.04	1	0.0690	2
14.0×8.5	103.495	4.62 (0.0446)	3	1.04	2	0.0819	3
13.0×9.5	104.132	4.62 (0.0444)	5	1.00	5	0.1355	5
13.5×9.0	104.117	4.62 (0.0444)	4	1.02	3	0.1049	4

表－6　等面積ライン　105.5㎡に対する評価方法別計算値（設計例－2）

ケーソン寸法	面積㎡	ΣS	順位	minS	順位	4σ²	順位
15.5×7.5	104.179	4.72 (0.0453)	2	0.03	3	0.093	4
16.5×7.0	104.985	4.83 (0.0460)	1	0.01	4	0.0785	2
15.0×8.0	106.266	4.77 (0.0449)	3	0.07	2	0.0755	1
14.5×8.5	107.745	4.79 (0.0445)	4	0.08	1	0.0875	3

表－7　等面積ライン　109㎡に対する評価方法別計算値（設計例－2）

ケーソン寸法	面積㎡	ΣS	順位	minS	順位	4σ²	順位
16.0×7.5	107.929	4.92 (0.0456)	6	1.06	2	0.0734	1
18.0×6.5	107.933	5.10 (0.0473)	3	1.02	7	0.1061	4
17.0×7.0	108.485	5.01 (0.0462)	5	1.04	4	0.0891	3
14.0×9.0	108.617	4.80 (0.0442)	8	1.06	3	0.1080	5
13.5×9.5	108.882	4.80 (0.0441)	9	1.04	5	0.1417	7
21.0×5.5	109.008	5.50 (0.0505)	1	1.00	9	0.200	9
19.5×6.0	109.274	5.31 (0.0486)	2	1.01	8	0.1505	8
15.5×8.0	110.266	4.93 (0.0447)	7	1.10	1	0.0799	2
18.5×6.5	111.183	5.25 (0.0472)	4	1.04	6	0.1231	6

以上のことより，統計的処理を行う③の方法を安全率の評価基準とした方が合理的であると考えられる。

(4) ケーソン形状比と地盤反力度の関係について

ケーソン底面積がほぼ一定で安定計算を満足するものが複数個あるとき，前項(3)では安定計算上の安全率の分散を評価基準とすることにした。そのため2例の既往設計例に基づいて比較，検討したが，ここでは，さらに一般の場合について，ケーソンの形状比（短径／長径）の変化と地盤反力度の変化との関係を安定計

算式から誘導することを試みた。その際に，指針の安定計算式ではケーソン周面地盤が3層であったり，底面せん断力を考慮するなどの理由から計算式が極めて複雑になるため，それに代わるものとして，より簡単なモデルである池原，横山の式を採用しそれに基づく検討を行った。

その結果，形状比の変化に対する地盤反力度の変化について，定性的なことはとらえることはできたが，定量的なことを把握するのは，その関数関係が極めて複雑である理由から実現できなかった。以下にこの検討結果を述べるが，用いた記号の説明は次のとおりである。

ℓ：ケーソン長　　A：ケーソン底面積

n：$\dfrac{短径}{長径}$　　K：$\dfrac{K_V}{K_H}=\dfrac{底面地盤反力係数}{前面地盤反力係数}$

α：底面についての断面二次モーメントの係数

q_1：橋軸方向荷重に対する底面地盤反力度

q_2：橋軸直角方向に対する底面地盤反力度

h：ケーソン天端から回転中心深さまでの長さ

θ：回転角　　δ：ケーソン天端における変位量

b：ケーソン長径寸法の 1/2

a：ケーソン短径寸法の 1/2

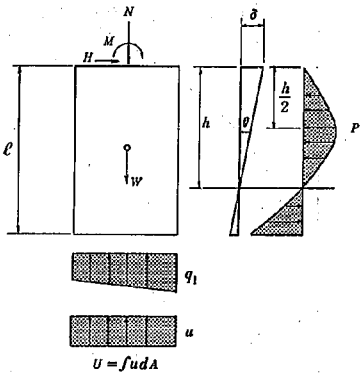
池原，横山式で地中の震度を 0 とすると

最大前面地盤反力度は

$$P=\frac{3\{3H\cdot\ell^3+4M\cdot\ell^2+8K\cdot a^3\cdot\alpha\cdot H\}^2}{4b\cdot\ell^3(6M+4H\cdot\ell)(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)}\quad\cdots\cdots(6)$$

最大底面地盤反力度は，

$$q_1=\frac{N+W-U}{A}+\frac{6K\cdot\alpha(3M+2H\cdot\ell)}{b(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)}\quad\cdots\cdots(7)$$



図－16　ケーソンの作用荷重

となる。さらにつぎの仮定をする。

ケーソン形状比が変化しても，底面積が一定ならケーソン躯体重量の変化は無視できるものとする。

したがって，(6)，(7)式中の a，b のみを変数とみなす。

(a)　底面地盤反力度の変化について

上記の仮定に基づいて，ケーソン形状比の変化に対する底面地盤反力度の変化の様相を調べるため

$$q=\frac{a}{b(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)}\quad\cdots\cdots(8)$$

の挙動を追求する。

① 橋軸方向荷重に対して（ $b\geqq a$ ）

小判形に対する α は，指針より

$$\alpha=1-0.411a/b=1-0.411n\qquad(n=a/b)$$

$$A=\pi\cdot a^2+4a(b-a)=a^2(\pi-4+4/n)$$

$$\therefore a=\left(\frac{A}{\pi-4+\frac{4}{n}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore b=\left[\frac{A}{n^2(\pi-4+\frac{4}{n})}\right]^{\frac{1}{2}}$$

この a，b を(8)式に代入すると

$$q=\frac{n}{\ell^3+24K\cdot A^{\frac{3}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}(1-0.411n)}\quad\cdots\cdots(8)'$$

となる。ここで，分母を X とおき微分すると

$$\frac{dq}{dn}=\frac{1}{X^2}\left(X-n\frac{dX}{dn}\right)$$

$$\frac{dX}{dn}=24K\cdot A^{\frac{3}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{\frac{3}{2}}\left\{\frac{6(1-0.411n)}{n^2(\pi-4+\frac{4}{n})}-0.411\right\}$$

$$\therefore X^2\frac{dq}{dn}=\ell^3+24K\cdot A^{\frac{3}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}\left\{1-\frac{6(1-0.411n)}{n(\pi-4+\frac{4}{n})}\right\}\quad\cdots\cdots(9)$$

したがって，ケーソン形状比の変化にともなう底面地盤反力度の変化を調べるには，(9)式を用いればよい。

(9)式は，与えられた外力に対して単に形状比を変化させた場合，地盤反力度の変化に関しては，ケーソン長，K および底面積も関係していることを示す。

(9)式を変形して

$$\frac{1}{f_1}=-(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}\left\{1-\frac{6(1-0.411n)}{n(\pi-4+\frac{4}{n})}\right\}$$

とおけば(9)式の右辺は

$$\ell^3-24K\cdot A^{\frac{3}{2}}\frac{1}{f_1}$$

となり(9)式の関係より

$$\frac{24K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}\lesseqgtr f_1\quad\cdots\cdots(10)$$

を得る。ここでf_1は

$$f_1=\frac{n(\pi-4+\frac{4}{n})^{\frac{5}{2}}}{2+n(1.534-\pi)}$$

であるので，与えられたK，ℓ，Aについてnを変化させた場合の底面地盤反力度の増減は，(10) 式の判定から決まる。

② 橋軸直角方向荷重に対して，（$b \geqq a$）

$$\alpha=1-0.644a/b+0.288(a/b)^2-0.055(a/b)^3$$

$$a=\left(\frac{A}{\pi-4+\frac{4}{n}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$b=\left\{\frac{A}{n^2(\pi-4+\frac{4}{n})}\right\}^{\frac{1}{2}}$$

上式の関係を(8)式に代入するが，このときa，bを交換する。また，$n'=1/n$とおく。

$$q=\frac{b}{a\ (\ell^3+24K\cdot b^3\cdot\alpha)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)''$$

$$q=\frac{n'}{\ell^3+24K\cdot A^{\frac{3}{2}}\{n'(\pi-4+4n')^{-\frac{1}{2}}\}^3\cdot(1-0.644/n'+0.288/n'^2-0.055/n'^3)}$$

上式の分母をXとおき

$$\frac{dq}{dn'}=\frac{1}{X^2}(X-n'\frac{dX}{dn'})$$

に代入すると

$$\therefore X^2\frac{dq}{dn'}=\ell^3-24K\cdot A^{\frac{3}{2}}n'^3(\pi-4+4n')^{-\frac{3}{2}}$$

$$\cdot\{-6n'(\pi-4+4n')^{-1}\alpha+2-0.644/n'+0.055/n'^3\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

(11) 式を変形して

$$\frac{1}{f_2}=(\pi-4+4n')^{-\frac{3}{2}}\{-6n'^4\cdot\alpha(\pi-4+4n')^{-1}+2n'^3-0.644n'^2+0.055\}$$

とおけば，(11) 式の右辺は

$$\ell^3-24K\cdot A^{\frac{3}{2}}\frac{1}{f_2}$$

となり，(11) 式の関係より

$$\frac{24K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}\lesseqgtr\frac{1}{f_2}$$

を得る。ここで，$n=1/n'$であるから

$$\frac{dq}{dn}=\frac{dq}{dn'}\cdot\frac{dn'}{dn}=(-\frac{1}{n^2})\frac{dq}{dn}$$

であり，符号を変えさらにn'の代わりに$1/n$を代入する

$$\frac{24K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}\gtreqless\frac{1}{f_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

$$f_2=\frac{n^4(\pi-4+\frac{4}{n})^{\frac{5}{2}}}{2+(2\pi-6.712)n+n^2(0.848-0.644\pi)+0.55n^3+0.055n^4(\pi-4)}$$

を得る。

以上で求めたf_1, f_2はいずれも形状比のみの関数で，nに対するf_1, f_2の値を図－17に示してある。

図－17からわかるように

$f_{1min}=38.924$　（$n=0.835$のとき）

$f_{2max}=18.492$　（$n=1.0$のとき）

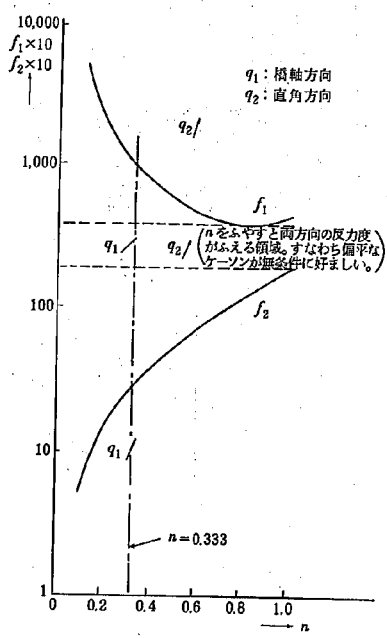
であるから

$$f_{2max}<\frac{24K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}<f_{1min}$$

の場合はnを大きくすれば，橋軸方向，橋軸直角方向の底面地盤反力度は増加する。したがって，このような場合底面地盤反力度のみに着目すれば偏平なケーソン基礎が好ましい。

(b) ケーソン天端の変位量の変化について

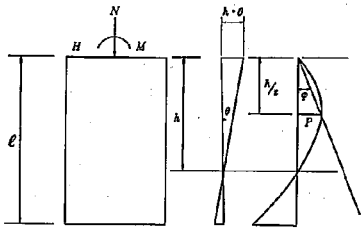
池原，横山式の前面地盤反力度の最大値は，前述の



図－17　f_1, f_2の値

(7)式で表わされる。一方，前面地盤反力度に対する許容水平支持力度は，鉛直方向の深さの関数である。

したがって，ケーソン形状比の変化に対する最大地盤反力度の変化を調べるとき，Pを生じる位置，すなわちケーソン回転中心までの深さの 1/2 における変化



図－18

も調べる必要がある。

以上を考慮して，ここでは図－18 に示す角度(ψ)の変化に着目し

ψが増加するとき　　Pは危険側になる。

ψが減少するとき　　Pは安全側になる。

と考える。

また，$\tan\psi$は，$h\cdot\theta$に比例することから，前面地盤反力度の変化を調べる代わりにケーソン天端の変位量の変化を追求することにする。

$$\tan\psi=\frac{P}{\frac{h}{2}}=\frac{\frac{K_1\cdot h^2\cdot\theta}{4\cdot\ell}}{\frac{h}{2}}=\frac{K_1}{2\ell}\ h\cdot\theta=\frac{K_1}{2\ell}\ \delta$$

$$=\frac{K_1}{2\ell}\cdot\frac{(3H\cdot\ell^3+4M\cdot\ell^2+8K\cdot a^3\cdot\alpha\cdot H)}{\ell(4H\cdot\ell+6M)}\cdot\frac{3(4H\cdot\ell+6M)}{K_1\cdot b\cdot\ell(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)}$$

$$=\frac{3}{2\ell^3}\cdot\frac{(3H\cdot\ell^3+4M\cdot\ell^2+8K\cdot a^3\cdot\alpha\cdot H)}{b(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)}$$

いま

$$F=\frac{2\ell^3}{3}\tan\psi=\frac{(3H\cdot\ell^3+4M\cdot\ell^2+8K\cdot a^3\cdot\alpha\cdot H)}{b(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)}$$

とおけば

$$\frac{dF}{dn}=\frac{1}{\{b(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)\}^2}[8H\cdot K\cdot b(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot\alpha)\frac{d}{dn}(a^3\cdot\alpha)-(3H\cdot\ell^3+4M\cdot\ell^2+8K\cdot a^3\cdot\alpha\cdot H)\{\frac{db}{dn}(\ell^3+24K\cdot a^3\cdot b)+24b\cdot K\frac{d}{dn}(a^3\cdot\alpha)\}]$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

を得る。

① 橋軸方向荷重に対して（$b\geqq a$）

$$\alpha=1-0.411n$$

$$a=\left(\frac{A}{\pi-4+\frac{4}{n}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$b=\frac{1}{n}\left(\frac{A}{\pi-4+\frac{4}{n}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

であるから，(13) 式の分子はつぎのようになる。

$$\text{分子}=-64H\cdot K\cdot\ell^3(1+\frac{3M}{2H\cdot\ell})\cdot b\frac{d}{dn}(a^3\cdot\alpha)-3H\cdot\ell^6(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})\frac{db}{dn}-16H\cdot K\cdot\ell^3(5+\frac{6M}{H\cdot\ell})\ a^3\cdot\alpha\frac{db}{dn}-192H\cdot K^2\cdot a^6\alpha^2\frac{db}{dn}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

ここで

$$b\frac{d}{dn}(a^3\cdot\alpha)=b\cdot a^2(3\alpha\frac{da}{dn}+a\frac{d\alpha}{dn})$$

$$=A^2\cdot n^{-3}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-3}\{6-4.11n+0.411n^2(4-\pi)\}$$

$$\frac{db}{dn}=A^{\frac{1}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}\ n^{-2}(4-\pi-\frac{2}{n})$$

$$a^3\alpha\frac{db}{dn}=A^2(\pi-4+\frac{4}{n})^{-3}n^{-2}(4-\pi-\frac{2}{n})(1-0.411n)$$

$$a^6\alpha^2\frac{db}{dn}=A^{\frac{7}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{9}{2}}n^{-2}(4-\pi-\frac{2}{n})(1-0.411n)^2$$

したがって (14) 式は

$$\text{分子}=-144H\cdot K\cdot\ell^3(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})A^2(\pi-4+\frac{4}{n})^{-3}n^{-3}\{4-(\pi-0.712)n\}+3H\cdot\ell^6(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})A^{\frac{1}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}n^{-3}\{2-(4-\pi)n\}+192H\cdot K^2\cdot A^{\frac{7}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{9}{2}}n^{-3}\{2-(4-\pi)n\}(1-0.411n)^2$$

式を簡単にするため上式中の第 2 項で割り整理するとつぎのようになる。

$$\frac{K^2\cdot A^3}{\ell^6}\cdot\frac{64}{(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})}\cdot\frac{(1-0.411n)^2}{(\pi-4+\frac{4}{n})^3}-\frac{K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}\cdot\frac{48\{4-(\pi-0.712)n\}}{(\pi-4+\frac{4}{n})^{\frac{3}{2}}\{2-(4-\pi)n\}}+1\gtreqless 0\quad\cdots\cdots(15)$$

ここで，

$$C_1=\frac{K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}\qquad C_2=1+\frac{4M}{3H\cdot\ell}$$

$$f_3=\frac{64(1-0.411n)^2}{(\pi-4+\frac{4}{n})^3}$$

$$f_4=\frac{48\{4-(\pi-0.712)n\}}{(\pi-4+\frac{4}{n})^{\frac{3}{2}}\{2-(4-\pi)n\}}$$

とおくと(15)式は

$$\frac{C_1^2}{C_2}f_3-C_1f_4+1\gtreqless 0 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

となる。(15), (16)式から，ケーソン形状比の変化にともなうψの変化（間接的にはPの変化）に関しては，ケーソン長，底面積，Kの他に，外力M，Hも関係しており極めて複雑な関係であることがわかる。

② 橋軸直角方向荷重に対して（$b\geqq a$）

$$\alpha=1-0.644n+0.288n^2-0.055n^3$$

橋軸方向の場合とa，bを交換することにより，(13)式の分子はつぎのようになる。

$$\text{分子}=-64H\cdot K\cdot\ell^3(1+\frac{3M}{2H\cdot\ell})a\frac{d}{dn}(b^3\cdot\alpha)-3H\cdot\ell^6$$

$$(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})\frac{d\alpha}{dn}-16H\cdot K\cdot\ell^3(5+\frac{6M}{H\cdot\ell})b^3\alpha\frac{d\alpha}{dn}$$

$$-192H\cdot K^2\cdot b^6\cdot\alpha^2\frac{d\alpha}{dn} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

ここで

$$a\frac{d}{dn}(b^3\alpha)=A^2(\pi-4+\frac{4}{n})^{-3}n^{-5}\{3(4n-n\pi-2)$$

$$\alpha+n^2(\pi-4+\frac{4}{n})\frac{\partial\alpha}{\partial n}\}$$

$$\frac{d\alpha}{dn}=2A^{\frac{1}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}n^{-2}$$

$$b^3\cdot\alpha\frac{d\alpha}{dn}=2A^2(\pi-4+\frac{4}{n})^{-3}n^{-5}\cdot\alpha$$

$$b^6\cdot\alpha^2\frac{d\alpha}{dn}=2A^{\frac{7}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{9}{2}}n^{-8}\cdot\alpha^2$$

であるから，(17)式はつぎのようになる。

$$\text{分子}=-144H\cdot K\cdot\ell^3(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})A^2(\pi-4+\frac{4}{n})^{-3}n^{-5}$$

$$\{3(4n-n\pi-2)\alpha+n^2(\pi-4+\frac{4}{n})\frac{d\alpha}{dn}+2\alpha\}$$

$$-6H\cdot\ell^6(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})A^{\frac{1}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}n^{-2}$$

$$-384H\cdot K^2\cdot A^{\frac{7}{2}}(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{9}{2}}n^{-8}\cdot\alpha^2$$

また，上式にα，$\frac{d\alpha}{dn}$の式を代入すると

$$\text{分子}=144H\cdot K\cdot\ell^3(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})A^2(\pi-4+\frac{4}{n})^{-3}n^{-5}$$

$$\{4+3(\pi-4)n+(4-1.288\pi)n^2+$$

$$(0.288\pi-1.592)n^3\}-6H\cdot\ell^6(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})A^{\frac{1}{2}}$$

$$(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{3}{2}}n^{-2}-384H\cdot K^2\cdot A^{\frac{7}{2}}$$

$$(\pi-4+\frac{4}{n})^{-\frac{9}{2}}n^{-8}(1-0.644n+0.288n^2-0.055n^3)$$

となり，式を簡単にするために第2項で割り整理するとつぎのようになる。

$$-\frac{K^2A^3}{\ell^6}\cdot\frac{64}{(1+\frac{4M}{3H\cdot\ell})}\cdot\frac{(1-0.644n+0.288n^2-0.055n^3)}{(\pi-4+\frac{4}{n})^3n^6}$$

$$+\frac{K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}\cdot\frac{24\{4+3(\pi+4)n+(4-1.288\pi)n^2}{(\pi-4+\frac{4}{n})^{\frac{3}{2}}n^3}$$

$$\frac{+(0.288\pi-1.592)n^3\}}{}-1\gtreqless 0 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18)$$

ここで

$$C_1=\frac{K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3} \qquad C_2=1+\frac{4M}{3H\cdot\ell}$$

$$f_5=\frac{64(1-0.644n+0.288n^2-0.055n^3)}{(\pi-4+\frac{4}{n})^3n^6}$$

$$f_6=\frac{24\{4+3(\pi-4)n+(4-1.288\pi)n^2}{(\pi-4+\frac{4}{n})^{\frac{3}{2}}n^3}$$

$$\frac{+(0.288\pi-1.592)n^3\}}{}$$

とおくと，(18)式は

$$-\frac{C_1^2}{C_2}f_5+C_1f_6-1\gtreqless 0 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

となる。

(c) 既往設計例に対する適用とその検討

図－3に示す既往設計例に以上の結果を適用してみる。なお，ここではケーソンの底面積を表－7に示す$A=109\ m^2$と仮定した。

$$C_1=\frac{24K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}=\frac{24\times3\times109^{\frac{3}{2}}}{26.5^3}=4.403$$

$$C_1'=\frac{K\cdot A^{\frac{3}{2}}}{\ell^3}=0.1835$$

$$C_2=1+\frac{4M}{3H\cdot\ell}=1+\frac{4\times13836}{3\times1400\times26.5}=1.497$$

$$C_2'=1+\frac{4M'}{3H'\ell}=1+\frac{4\times6838}{3\times669\times26.5}=1.514$$

ケーソン形状比（n＝短径／長径）を0.1から1.0まで変化させるものとすると，地盤反力度の変化について以下のことが予想される。

① 橋軸方向底面地盤反力度について

(10)式の判定を行うと，C_1は常にf_1より小である。

$$C_1=4.403<f_{1min}=38.924\leqq f_1$$

したがって，ケーソンの長径を小さくして，短径を大きくすると，橋軸方向底面地盤反力度は増加する。

② 橋軸直角方向底面地盤反力度について

(12) 式の判定を行うと，$C_1=f_2$ となるのは $n=0.435$ である。したがって，$n<0.435$ の範囲内で n を大きくすると，橋軸直角方向底面地盤反力度 q は大きくなり，$n=0.435$ のとき q は最大値をとり，n をさらに大きくすると（$n>0.435$）q は減少する。

③ 橋軸方向のケーソン天端の変位量

(16) 式に前述の C_1', C_2 を代入すると

$$\frac{C_1'^2}{C_2}f_3-C_1'f_4+1=\frac{0.1835^2}{1.497}f_3-0.1835f_4+1$$

$$=0.0225f_3-0.1835f_4+1$$

となるが，上式は $0.1\leqq n\leqq 0.57$ の範囲内では正，$0.57<n$ では負となる。したがって，$n\leqq 0.57$ の範囲で n を増加すると変位量は増加するが，$n=0.57$ で最大となり，$0.57<n$ では変位量は減少する。

④ 橋軸直角方向のケーソン天端の変位量

(19) 式から

$$-\frac{C_1'^2}{C_2'}f_5+C_1'f_6-1=-\frac{0.1835^2}{1.514}f_5+0.1835f_6-1$$

$$=-0.0222f_5+0.1835f_6-1$$

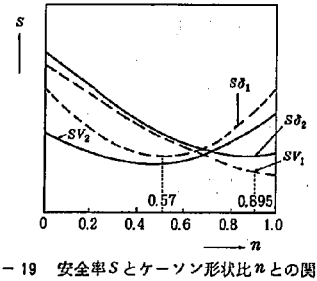
となるが，上式の値が0となるのは $n=0.895$ のときである。したがって，$n<0.895$ の範囲内で n を大きくすると，変位量は増加し，$n=0.895$ のとき最大値となり，n をさらに大きくすると（$n>0.895$）変位量は減少する。

以上の結果より安全率 S とケーソン形状比 n との関係を示せば，図－19のようになる。

ここで

S_{V1}：橋軸方向の$\dfrac{\text{許容鉛直支持力度}}{\text{最大底面地盤反力度}}$

S_{V2}：橋軸直角方向の$\dfrac{\text{許容鉛直支持力度}}{\text{最大底面地盤反力度}}$



図－19　安全率 S とケーソン形状比 n との関係

$S_{\delta 1}$：橋軸方向の$\dfrac{\text{許容変位量}}{\text{変位量}}$

$S_{\delta 2}$：橋軸直角方向の$\dfrac{\text{許容変位量}}{\text{変位量}}$

したがって，この既往設計例のケーソン基礎では，底面積を一定とした場合には，すべての安全率を最小にする形状比は存在しないことがわかる。

また，これまでのアプローチより安全率は独自の挙動をするものと推定される。

このようなことから，安定計算上の安全率に着目してケーソンの形状を決定する場合，安全率の分散を基準とするのが合理的であると考えられる。

〔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にした。

（1）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値は，作業室内圧により制限を受ける。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値を特に設ける必要はなくなったといえる。

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，直接基礎として取り扱うのが妥当であることから本自動設計の対象外とし，既往ケーソン基礎の断面形状を考慮して根入れ長の最小値を10m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作業中の傾斜・回転などに起因する誤差を度外視すると，沈下作業においては一般に円形または小判形のものが有利である。また，構造の面からも円形，小判形はアーチ作用が期待できることから，断面を経済的にすることが可能で，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小さくすることもできる。

最近の施工例においても，上部工の反力が極めて大きなとき以外は円形または小判形断面を採用する場合が多く，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ケーソン基礎を対象とすることにした。

3）外形寸法について

ケーソンの外形寸法は，基礎としての安定性のみでなく，

① ケーソン基礎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

などから決定される。本自動設計では，上部構造の幅員が4車線（4車線以上は，分離施工される場合が多い），スパン60 m程度までの道路橋橋脚ケーソン基礎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を取ることにした。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－20は，既往ケーソン基礎の施工実績における頂版厚，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るが，この調査結果に基づいて自動設計では，各部材厚について表－8に示すような下限値および上限値を設定した。このために設計範囲が制限されるきらいはあるが，あえて上・下限値を設けたのは従来のケーソン基礎のイメージからかけ離れた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。

（2）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

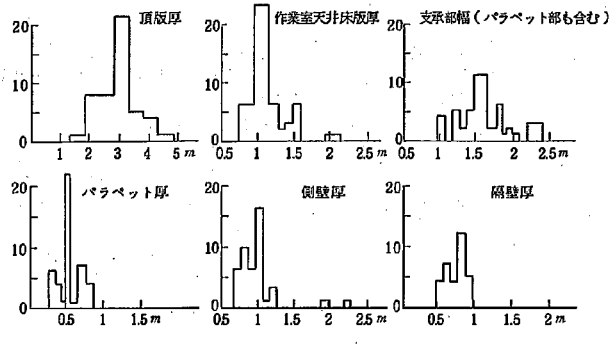
2－(1)で述べたようにケーソン基礎設計の最適化のための目的変数は底面積であり，底面積がほぼ同一とみなせる場合については，次後の目的変数として安定性に関する安全率の分散を設定することにした。すなわち，第1の評価基準として底面積の最小化をとり，第2の評価基準として安全率の分散の最小化を設定することである。

本自動設計においては，ケーソン外形寸法の変化のきざみ幅を0.5 m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あり，この近似解は外形寸法のきざみ幅に支配される。また，底面積の差は微少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

表－8　各部材の最小値・最大値・きざみ幅

（単位：m）

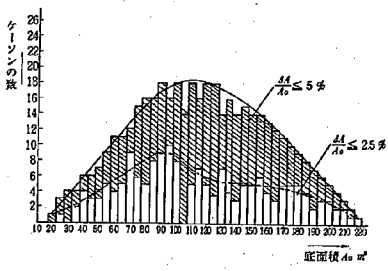
	最小値	最大値	きざみ幅
パラペット厚	0.3	0.8	0.1
側壁支承幅	1.0	1.7	0.1
側壁厚	0.7	1.2	0.1
刃口基部厚	0.9	1.3	0.1
隔壁支承幅	0.5	1.5	0.1
隔壁厚	0.5	0.9	0.1
頂版厚	1.5	4.5	0.5
支承厚	0.5	2.5	0.5
支承ハンチ高	1.0	2.0	0.5
下床版厚	0.8	1.5	0.1



図－20　既往実績部材厚

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，つぎのような検討結果より設計可能な最小底面積に対して $\Delta A/A_0 \leq 2.5\%$ とした。なお，A_0 は基準とする底面積，ΔA は A_0 に対して無視できる面積の許容範囲で，底面積一定とみなせる許容範囲を $\Delta A/A_0$ で表現したものである。

① 自動設計で対象とするケーソンの外形寸法のきざみ幅は 0.5 m であり，ケーソン底面積の分布は図－21 に示すように下限値約 20 m²，上限値約 220 m² である。また，分布のピークは約 100 m² 前後であり，全体の 70 % は約 60 m²～170 m² の間に含まれる。



図－21　底面積がほぼ等しいケーソンの分布図

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事費の鋭敏性から 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形寸法の組数およびその分布状態を，図－21 に示すケーソン底面積 60 m²～170 m² について調べてみると，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得ると判断し，底面積の緩和区間を 2.5 % とした。

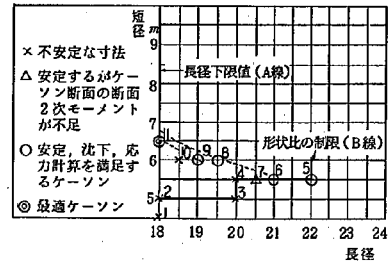
なお，図－22 は最適ケーソンの選定手順を示したものであるが，その流れを概説すると次のとおりである。

a) 設計対象範囲の設定

インプットされた長径，短径寸法（初期値となる）および外形寸法の形状比の制限値より，設計対象範囲が限定される。（図－22 中の A 線，B 線）

b) 底面積最小ケーソンの設定

安定，沈下，応力計算を満足する短径最小でかつ底



図－22　最適ケーソン選定手順

面積最小のケーソンを2分法により設定する。（図－22 の①～⑦のステップより⑥を求める）

c) 等面積線の設定とその線上のケーソンの設定

上記で求まった⑥の底面積（$A = 109.01$ m²）を1.025 倍した等面積線を設定する。この等面積線を上限値とし，ケーソン形状を変化させ（短径は増加，長径は減少の方向となる）安定，沈下，応力計算を満足するケーソンを設定する。（図－22 中の⑧，⑨，⑪を求める）

d) 評価基準による最適ケーソン形状の選定

上記のようにして求めた設計対象ケーソン群は，すべて底面積最小とみなせるから，次に，これらのケーソンに対し安全率の分散の比較を行い，分散が最小であるものを最適ケーソンとして選定する（図－22 の⑪に示す）

なお，参考のため設計結果を示せば表－9 のとおりである。

2) 各部材厚の決定

ケーソン基礎の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した。

a) 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

表－9　最適ケーソン選定手順の結果

順位	ケーソン番号	ケーソン寸法	底面積 m²	安全率のばらつき	総合順位
1	⑨	19.0×6.0	106.274	0.046	2
2	⑪	18.0×6.5	107.933	0.039	1
3	⑥	21.0×5.5	109.008	0.063	注）対象外
4	⑧	19.5×6.0	109.274	0.050	

注）$106.274 \times 1.025 = 108.931$ m²

内圧およびケーソン周面摩擦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，設計にあたっても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してケーソン重量を増加しなければならない。

b）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梁や板などとして取り扱っているため，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つぎのようなものがある。

① 刃口基部厚≧側壁厚

② 作業室天井スラブ厚≧側壁厚

③ 側壁厚≧隔壁厚

④ 側壁厚＞パラペット厚

なお，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した。

c）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値以下で応力度が許容値内におさまれば断面は初期値で決定されるが，許容値を超える場合は，断面は各部材ごとに設定されたきざみ幅で増加する。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，$\sigma_c=\sigma_{ca}$としたときの必要鉄筋量を比較し，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超える場合，頂版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加させることとした。

d）部材厚に対する最大鉄筋量について

曲げモーメントが大きく，それに比べてせん断力が小さい場合，部材厚をそのままにして鉄筋量を増す方法と部材厚を増して鉄筋量を減らす方法が考えられる。

本自動設計では，つぎに述べる理由から，その部材厚に対する最大鉄筋量の制限を設け，配筋はその範囲内で行うものとし，必要鉄筋量がその制限値を超える場合には部材厚を増すものとする。

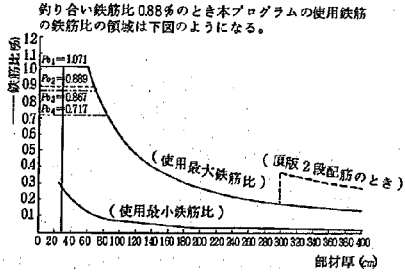
① 鉄筋およびコンクリートの応力度がともに許容値に近い値となることが望ましい。

② 部材厚が小さすぎるため多量の鉄筋を使用してコンクリートの縁圧縮応力度を許容値以下にすると，施工が困難になる場合があり，かつせん断力に対しては危険側となる。

③ 部材厚を増すことにより沈下は有利となる。

④ 最終的には経済性の観点から決定されるべきであるが，既往設計例にみられる部材厚と鉄筋量との関係にも整合させる必要がある。

したがって，部材厚に対する最大鉄筋量の制限は，つり合い鉄筋比に関して上限を0.8％程度とし，図－23に示すような範囲を設けることにした。また，使用鉄筋の材質はSD 30，最大径32㎜とし，鉄筋の組立作業およびコングリートの打設能率を低下させないために，頂版以外は2段配筋を行わないようにした。



図－23　各部材厚と最大鉄筋比・最小鉄筋比との関係

3）隔壁枚数とその位置

隔壁枚数およびその位置は，ケーソン外形寸法に応じて経験的に5～7 m間隔で均等割りされているが，その決定にあたっては，シャフトの艤装や構築の作業能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る。隔壁枚数とその位置の決定について，以下のような検討を行った。

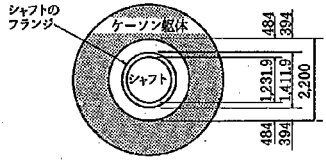
a）ケーソンの内空寸法とシャフトの艤装の関係

シャフトの艤装，解体および内型枠施工の面から，ケーソンの内空寸法の最小値として，図－24に示すように

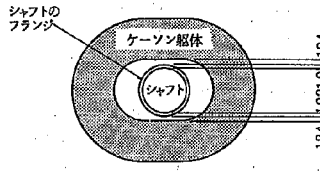
円形の場合　2.2 m

小判形の場合　1.6 m

とした。これは作業員の昇降に40㎝程度の空間が必要なことからである。また，小判形ケーソンでは橋軸直角方向に空間があることから，橋軸方向には内型枠の施工可能な空間として18㎝程度確保できるようにする。この内空寸法において，構築時に最も厳しい条件となる小判形ケーソンの内型枠の取付状態を図－25に示す。

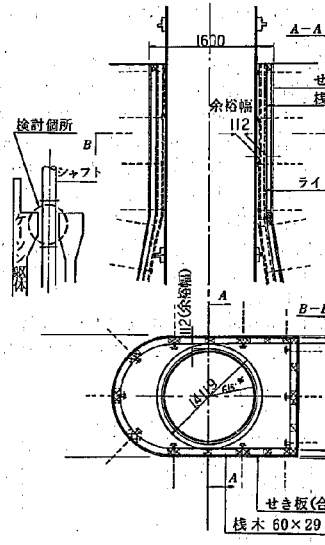


(a) 円形の場合



(b) 小判形の場合

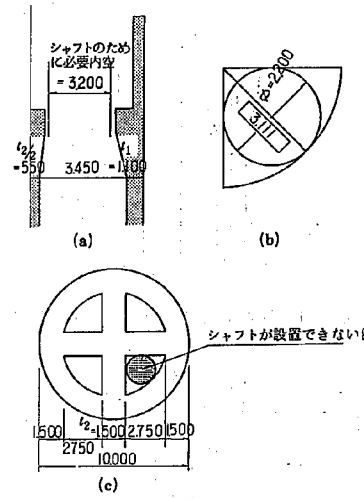
図－24　ケーソン内空寸法の最小値



図－25　内型わくの取付けと空間

b) 円形ケーソンの隔壁について

円形ケーソンの場合の必要最小内空寸法は，前項に示すごとく 2.2 m である。本自動設計では円形ケーソンの最大径を 10 m としており，十字形の隔壁を設けた場合は支承部で内空が小さくなり，図－26 に示すごとくシャフト設置に必要な内づら半径 3.2 m が確保できない状態がほとんどである。したがって，円形ケーソンの場合は隔壁を設けないこととした。



図－26　円形ケーソンの必要内空寸法

c) 小判形ケーソンの隔壁について

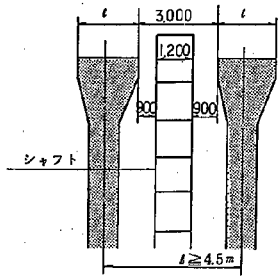
小判形ケーソンの場合，短径寸法が小さいケーソンでは図－25 に示すように短径方向のシャフト設置余裕がほとんど得られないので，長径方向の余裕をみこむ必要がある。図－27 はシャフトと隔壁の寸法関係から隔壁間最小間隔 3.0 m；隔壁中心間隔 $\ell \geqq 4.5$ m（$t \leqq 1.5$ m である）とした位置関係を示すものである。

また，隔壁の最大間隔は，既往実績より 6～7 m としており，隔壁を設ける区間は側壁の直線部とした。

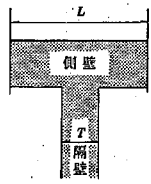
直線区間長に対する隔壁枚数は，直線区間長を L とすれば，隔壁支承部の幅 T を最大値 1.5 m として $L \geqq T$ より（図－28）

$L < 1.5$ m	隔壁なし
$1.5\ \text{m} \leqq L \leqq 5.5$ m	隔壁 1 枚
$6.0\ \text{m} \leqq L \leqq 10.5$ m	隔壁 2 枚
$10.5\ \text{m} \leqq L \leqq 14.5$ m	隔壁 3 枚
$14.5\ \text{m} \leqq L \leqq 19.0$ m	隔壁 4 枚
$19.0\ \text{m} \leqq L$	隔壁 5 枚

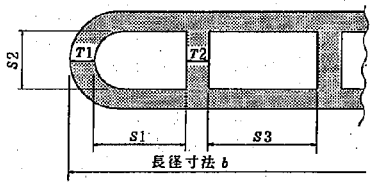
がその設置可能最大枚数となるが，$L \geqq 19.5$ m とな



図－27　隔壁間最小間隔と隔壁中心間隔の関係



図－28　直線区間と隔壁厚の関係



図－29　小判形の隔壁の位置

るのは，

長径 $b=24\ m$ のとき，短径 $a=4\ m$ および $4.5\ m$

$b=23.5\ m$ のとき，$a=4\ m$

の3ケースしかないので，隔壁枚数は4枚までとする。

また，小判形ケーソンの場合は，図－29に示す $S_1 \geqq 2.2\ m$，$S_2 \geqq 1.6\ m$，$S_3 \geqq 3.0\ m$ を満足する必要があり，$T_1 \leqq 1.7\ m$，$T_2 \leqq 1.5\ m$ の最大値をとるとすれば，隔壁1枚が設置可能な長径寸法 b は

$$b \geqq 2(S_1+T_1)+T_2$$
$$\geqq 9.3\ m \longrightarrow 9.5\ m$$

となる。

以上の諸条件を満足するケーソン外形寸法と隔壁枚数の関係を示せば表－10のとおりであり，これをプログラムに組込んでいるが，ケーソン寸法が大きい場合は隔壁枚数は2種類の組合せを採用している。これは隔壁枚数は少ない方が施工上有利であるが，構造上不利となったり，工期が短い場合シャフト本数をふやして掘削能率を高めるための隔壁枚数を多くすることもあるからであり，隔壁枚数の最終的な選択は，個々の設計条件に対する総合的な判断によって，設計者が決定するようにしている。

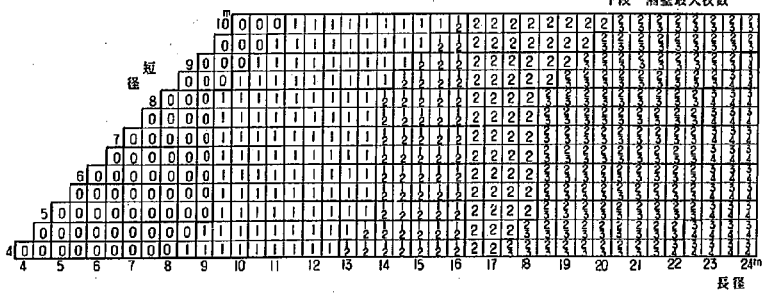
つぎに隔壁位置の決定は，側壁水平断面の設計において，一方向偏荷重状態に対して隔壁に生じる曲げモーメントを可能な範囲内で最小にするように設置する。すなわち，近似解として図－30(a)に示す構造を(b)，(c)に示す構造に分解し(b)に対しては，隔壁1枚のときの偏荷重状態に対して最小仕事の原理を用い，また，隔壁間については両端固定梁として部材端モーメント M_A，M_A' を求め，上記条件のもとで $|M_A-M_A'|$ を最小にするように決定する。

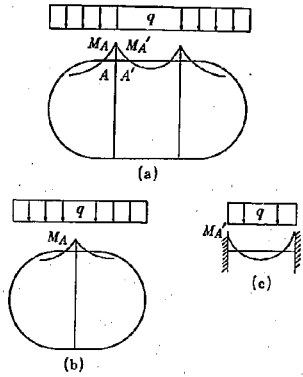
4) シャフト本数とその位置

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－31はケーソン底面積と

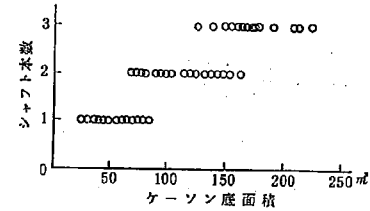
表－10　自動設計適用範囲と隔壁枚数

上段　隔壁最小枚数
下段　隔壁最大枚数





図－30



図－31　ケーソン底面積とシャフト本数（施工実績）

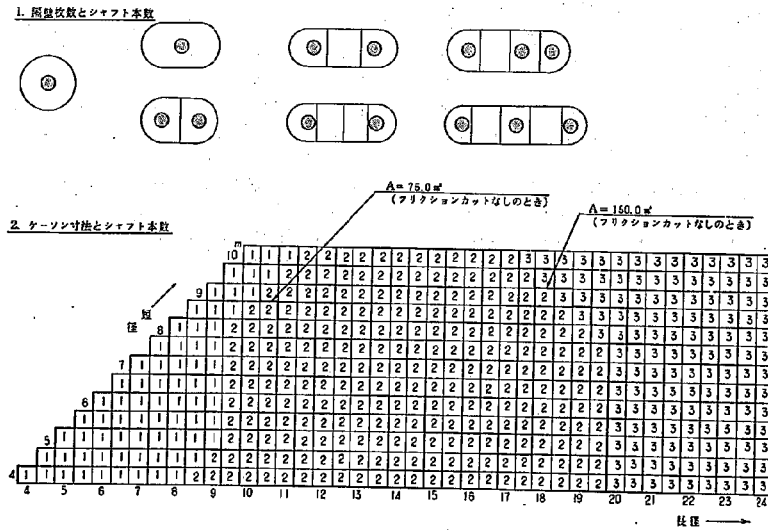
シャフト本数との関係について，既往設計例を調査した結果であるが，シャフト本数はケーソン底面積と関係していることがわかる。

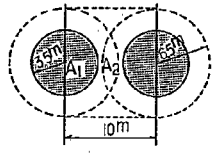
また，シャフト本数が制約される他の要因として，シャフト間の距離およびシャフトと刃口までの距離が考えられ，人力掘削ではシャフトを中心として半径約6 mの範囲までは掘削能率が保たれる。すなわち，土砂搬出用バケットの位置をシャフト直下において半径1 mの範囲とし，バケットから2.5 mの範囲は掘削した位置から直接バケットに積み込むものとし，その外方3 mの範囲は"一段はねつけ"と考える。（図－32）掘削能率を上げるためには"一段はねつけ"，"二段はねつけ"による掘削面積を少なくするようにシャフトを配置することが望ましく，重複部分を考慮すればシャフト間の離れは最大10 m程度にするのが望ましいと判断される。

このような調査検討結果より，表－11に示すようなケーソン寸法とシャフト本数の関係を設定し，隔壁枚数との相互関係も考慮してプログラムに組み込んだ。

また，シャフト位置の決定は，シャフトとケーソン本体内面との離れを最小0.5 m（小判形の場合短径方向はこの限りでない）は確保するという条件のもとで，各シャフトが受け持つ掘削面積が等しくなるように配

表－11　ケーソン寸法，隔壁枚数とシャフト本数との関係





図－32　シャフトの最大離れ

置する。

(3) 設計基準との整合

本自動設計の適用範囲および主要な設計諸元決定アルゴリズムは前項にのべたが，ケーソン基礎の設計はこの外にも多くの検討項目がある。これらも「ケーソン指針」が骨子となってはいるが，技術者の判断によるところも多く，自動設計の開発に際して一番やっかいな部分である上に報告書としてまとめにくい部分である。したがって，本自動設計プログラムの流れと連繋させて，とりまとめを行った。

図－33および表－12は，各項目に対する「ケーソン指針」の取りきめ，その問題点ならびに自動設計プログラム上での処理についてのべたものである。

〔3〕設計の省力化

本自動設計における設計変数，制約条件の数は，3－(1)の入力データに示すごとく最大の場合で94個ある。これらの項目別内訳としては

設計荷重（外力を含む）関係 …… 15
単位体積重量，許容応力度関係 …… 12
地盤係数関係 …… 34
レベル関係 …… 9
橋脚寸法関係 …… 4
刃口形状関係 …… 5
ケーソン外郭寸法の上・下限値その他…… 15

となっており，これらに対するアウトプットである構造諸元は約70～100個程度となっている。

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，設計の自動化に際しては，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，プログラム内に組み込み，入力項目から除外することができるが，荷重，地盤係数，レベル関係などの設計変数は，上部工の種類，幅員，スパンまたは下部工の高さ，重量，地盤条件，環境条件などがその都度変化するので，これらの各項目についてはすべて入力する必要がある。

これら設計変数の入力項目を減少させるための1つの手法として，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なり，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は，設計変数，制約条件とアウトプットである構造諸元との対応関係を統計的に調べ，その感度分析により，感度の鈍い設計変数については常数化などを行い，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，検討を行った上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。

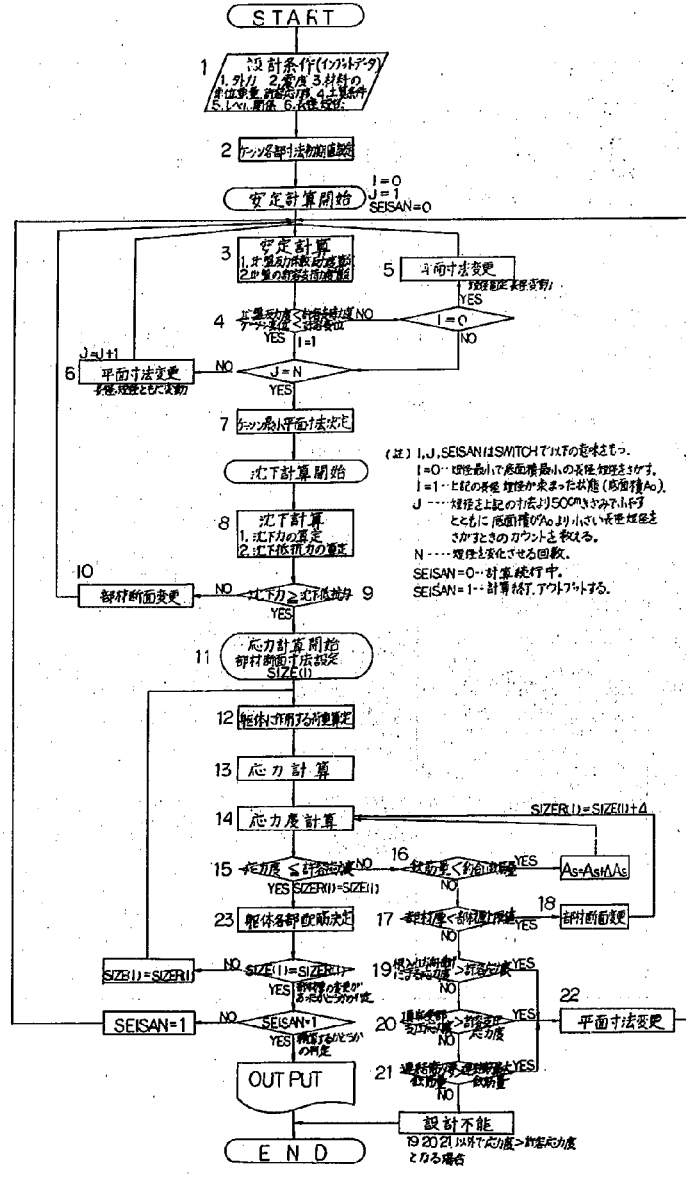
以上のような観点から，本節ではまず第1段階として，ケーソン外形寸法を決定する安定計算に係わる関係式を，より簡単な近似式で表現するための検討を行ったので，その結果を以下に述べる。なお，その試行過程の概略はつぎのとおりである。

(1) 計算モデルの簡易化を行う。
(2) 感度分析を行う際，多くの設計変数を整理しておく必要があり，また，各設計変数は相互に関係があると予想されるので，各設計変数について定式化を行う。
(3) 安定計算をその数式上数学的に追求して，各設計条件の構造諸元に対する感度分析が困難であることを示す。
(4) したがって，安定計算における地盤反力度に着目し，地盤反力度とケーソン外形寸法との関係について，2ケースの荷重状態の回帰式を求める。
(5) これら地盤反力度の回帰式より構造諸元 a，b を求め，既往設計と比較を行う。（a：短径，b：長径）
(6) 求めた回帰式による感度分析の効用についてのべる。

(1) 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，解析上からも極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試みた。

① ケーソン基礎の設計における第1段階は，荷重，地盤条件などに対する安定計算によって，根入れ長および外形寸法を決定することにあり，各部材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。



図－33 自動設計概略フローチャート

表－12　自動設計概略フローチャート説明および指針※との比較

項目	フローチャートの関連番号	※「道路橋下部構造設計指針・ケーソン基礎の設計篇」による取決め	問題点	自動設計プログラムにおける処理
地盤反力係数(変形係数)	1, 3	1.平板載荷試験 2.ボーリング孔内での測定 3.一軸または三軸圧縮試験 4.標準貫入試験 より測定ないしは推定した変形係数をもとにしてK値を算定する。	4の方法で算定した地盤反力係数が過大になったりK値の値が逆転するなどの不都合が生ずる場合もある。	設計者が総合的に判断した地盤反力係数をインプットすることにより、計算で求めたK値の修正が可能。
鉛直方向地盤反力係数	1, 3	1.均一地盤 2.弱い層を含む多層地盤 3.深さ方向に変化する地盤 各場合のKvの求め方を規定している。	2の場合 計算に必要な何層ものすべてのデータを得ることが困難であり、また実用計算としても好ましくない。	1な(1は)うの方法より算定する。直接インプットすることによりKvの修正が可能。
許容鉛直支持力度	1, 4	1.静力学公式による求め方 2.平板載荷試験による求め方 3.推定による求め方 より求める。	許容支持力度がきわめて大きな値となり設計上不都合となる場合がある。	設計者が判断した許容支持力度をインプットすることにより過大な計算値の修正が可能。
地震時設計地盤面	1, 3	耐震計算上支持力を無視する土層については C＝φ＝0とみなす。液状化についてはMWLの支持力を対象とする。軟弱土層の重量はそれ以下の地盤に載荷荷重として働く。「道路橋耐震設計指針・同解説」	軟弱土層が中間に存在する場合の処理のしかた等技術者の総合的な判断が要求される。	設計者が総合的に判断した地盤面をインプットする。
周面まさつ力度	1, 8	例として過去の実績を表7で示している。(D50)	過去の平均値では満足しないしている場合も多く、実情によって推定する必要がある。	1.N値に無関係な定数 2.N値に比例 3.[illegible] の3ケースの中から[illegible]選択する。
作業気圧	1, 8	一般に理論水圧(静水圧分布)を考える慣例がある。	設計段階で実際の作業気圧を想定することは困難。	理論水圧に対する比率をインプットすることで作業気圧を考慮してある。
附加沈下荷重	1, 8	沈下関係図に基づいて判断する。	ジェット噴射装置をとりつける場合、ジェットによる周面まさつ力の減少を数値化するのが困難である。	沈下荷重が不足する場合も想定し附加沈下荷重を考えるかどうかあらかじめ判断しておく必要がある。当プログラムでは附加沈下荷重の値をインプットする。
土の単位重量	1, 12	地下水位以下の土の単位重量＝地下水位以上にある土の単位重量－0.9としてよい。(「共通および設計一般編」)		指針にしたがう。ただしインプットとしては任意の値を入れる。
地中の水平震度	1, 3	考慮しない「道路橋耐震設計指針・同解説」	地中の水平震度も考慮する場合もある。	地中の水平震度はインプットする。
長径短径比および辺長比	1, 7	長径短径比は3:1より小さい方が好ましい。		[illegible]寸法および施工余裕を見込んで設計者が決定[illegible]。たたし[illegible]
刃口形状		刃口金物については「建設省道企発第29号(昭和48年 月 日)」による規定がある。		指針にしたがう。刃口形状としては フリクションカットの有無、テーパの有無より6タイプの中から選択する。
ロット分割	1			側壁部はインプット値による等分割(上部部でしおよび)とし、他の部分については従来の分割法にしたがう。なお沈下時ケーソン天端は刃口据付面＋1mとする。
シャフト数			掘削効率のみでなく、安全性も考慮する必要がある。	A＜75m²のとき1本、75m²～150m²かつ隔壁1枚のとき2本、A≧150m²のとき3本とする。
隔壁数		5m～6m間隔に隔壁を設けるのが好ましい。	最適な隔壁数およびその位置は強度の面からだけでなく、施工性、経済性をも考慮する必要がある。	隔壁中心間隔は4.5m～7mまでとし、ケーソン平面寸法によって選択する。長径8mまではなし、8.5m～16mまで1枚、16.5m～24mまで2枚とする。
ケーソン各部寸法初期値及び上限値	2, 10, 18		ケーソン各部部材厚に上限値を設定すると設計不能となる場合もある。	既往設計例をもとにして各部材の部材厚の分布を調べ最大値と最小値を設定し、それぞれ上限値、初期値とみなしプログラム内に組込んである。
安定計算における平面寸法の変更	5, 6			平面寸法のきざみは50cmとする。判断としては安定計算を満足する短径最小のケーソンをまず選択し(フロー5)それをもとに底面積最小の寸法を選択する(フロー6,7)
沈下計算における部材断面寸法の変更	10		沈下力が不足する場合、部材断面をふやすか附加沈下荷重を載荷するか、もしくはジェット等の処置をとるか総合的に判断して決める必要がある。	原則として自重による沈下を考えており、側壁、作業室天井床版の厚さを10cmきざみでふやしている。
安定計算	3	「4. ケーソンの地盤反力度と変位の計算」p29-46参照		指針にしたがう。ただし鉛直荷重のみを受ける場合でもケーソン周面地盤の抵抗力は無視した[illegible]を用いる。
土圧	4, 12	クーロン系土圧係数を用いる。静止土圧係数は0.5とする。		指針にしたがう。ただし地表面の傾斜は無視して水平であるものとしている。
地震時ケーソン前面地盤反力度の修正	12	最大前面地盤反力度が地層の境界で急変している場合、根入れ深さ方向への荷重分配を考慮して修正してもよい。		指針にしたがう。
刃口の検討	12,13,14	荷重＝静止土圧(ないしは主働土圧)＋水圧－作業気圧/3	施工時ケーソンの偏心、沈下時の衝撃等を考慮して、気圧力は許容値いっぱいにとらない方がよいと考えられる。	安全側を考慮し片持ち梁とみなして設計する。
二次応力の検討	12,13,14	片持支持状態、単純支持状態について検討する。	抵抗断面として(全体をとるか)(刃口部のみ)とするかによって必要鉄筋量がちがう。	安全側を考慮し、刃口部を梁とみなしている。ただし刃口先端[illegible]は計算上二次応力の鉄筋とみなしている。
作業室天井床版の検討	12,13,14	施工時(沈下荷重載荷時、シャフト撤去時)、竣工後の常時と地震時の4ケースについて検討する。竣工後、底スラブに作用する荷重は応力伝達線の重複しない限りすべて作業室天井床版で負うものとする。	竣工後底スラブに作用する荷重がきわめて大ないしはスラブのスパンが大のとき底スラブの存在による応力の伝達の仕方を考えないと、既往設計例とくらべてきわめて大きな断面厚および鉄筋量が必要となる。	指針の底スラブの隅に準じて45°の応力伝達線を想定し荷重の分配をおこなう。他は指針にしたがう。
側壁水平断面の検討	12,13,14	施工時(偏心した状態、シャフト撤去時)、竣工後常時および偏荷重を受ける地震時について検討する。解法はせん断力の項を無視した最小仕事の原理より求めた係数を用いてよい。	厳密には重ね合せの原理が成立しない解法であるが、きわめて簡易な手法なので従来広く一般的に用いられている係数である。	指針にしたがう。なお側壁水平断面の検討は各ロットごとで行なうが、下方で必要鉄筋量が小さい場合でも鉄筋量はへらさず、最大鉄筋量を生じる断面と同一配筋とする。
根入れ深さ方向の検討	12,13,14	施工時平状態と地震時の2ケースについて検討する。	平状態は施工の良否にも左右される。	沈下力(附加沈下荷重を含まない)で沈下抵抗力の場合は[illegible]の検討をする。
頂版の検討	12,13,14	施工時橋脚躯体コンクリートが硬化していない状態と竣工後常時、地震時について検討する。ディープビームの場合、所要鉄筋量について規定している。		指針にしたがう。
頂版と躯体の連結筋	12,13,14	上スラブ支持面と曲げモーメントと軸力をうける鉄筋コンクリート部材断面とみなせば十分である。上スラブ支持面積の0.2%以上配筋する。	頂版と躯体部とが完全に一体と考えると、頂版の抵抗や上スラブの固定端モーメントの影響について検討する必要がある。	安全側を考慮し、鉄筋を無視した上スラブ支持面の[illegible]より引張力を求め必要鉄筋量を求める。
パラペットの検討	12,13,14		パラペット上の上載または土留仮壁の構造により、パラペットに作用する力は異なる。	1.仮壁の荷重がすべてパラペットに作用する、2.仮壁に反力をとらせる、3.仮壁からの作用力を考えない、の3ケースの中から選択する。
鉄筋量	16		鉄筋量をふやすか断面をふやすかの判定は最終的にはコストの比較から決定される。	仮定した断面に対するつりあい鉄筋比([illegible])をその断面の最大鉄筋量としている。
応力計算における部材断面寸法の変更	18			原則として各部材厚のきざみΔtは10cmとする。ただし頂版厚きざみは50cmとする。
配筋	23		施工上鉄筋径および鉄筋間隔が制限される場合もある。	最大径D32以下とし、最小鉄筋間隔は75mm、最大鉄筋間隔は300mmとする。頂版底面[illegible]のみ2段配筋まで可能としている。[illegible]
スターラップ				せん断力は原則としてコンクリート断面で負担させることにしている。ただし、頂版、作業室天井床版、隔壁がある場合の側壁についてはスターラップでとらせてもよいものとしている。
応力計算における平面寸法の変更	22			1.根入れ方向曲げによる応力度＞許容応力度 2.せん断応力度＞許容せん断応力度 3.連結筋必要鉄筋量＞最大鉄筋量 の場合、ケーソン断面の二次モーメントが不足しているので平面寸法を変更する。

なお，安定計算は，設計条件が与えられるとケーソン形状（a，b）が求まるという関係式にはなっておらず，仮定したケーソン形状が安定計算における4つの制約条件を満足するか否かの判定にとどまっている。したがって，安定計算の中でa，bを決定するためには，もう1つa，bに関する条件が必要となる。この条件には，ケーソン基礎の構造諸元の中で最も重要な底面積最小を考慮することとする。

② 現行の「ケーソン指針」の安定計算は，ケーソン周面地盤の地層区分を最大3層までとしているため，設計変数，制約条件の数は30以上（図－34）となり，極めて複雑である。したがって，現行の「ケーソン指針」の安定計算に係わる関係式は，池原・横山の式における考え方の延長にあるものとして，池原・横山の式を準用することにする。

(2) 設計変数の定式化

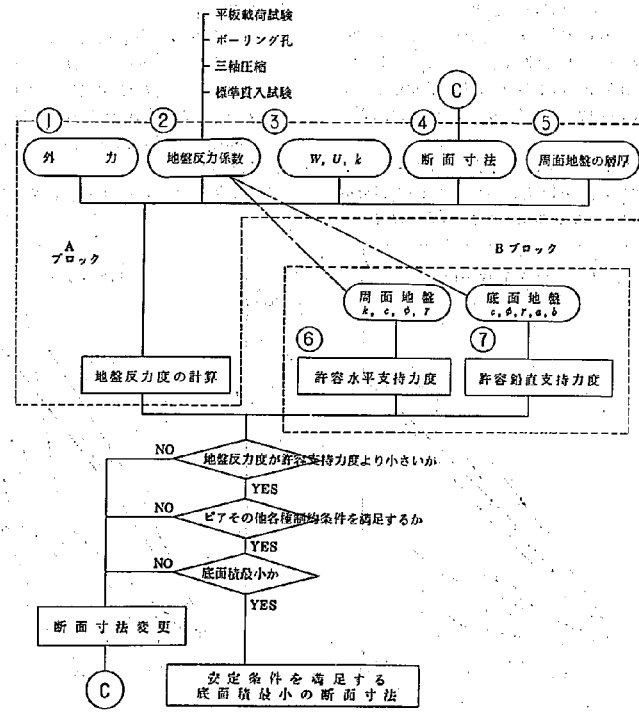
本項では，各々の設計変数の適用範囲を設定するとともに，調査結果を基にして相互に関連する変数間の関係を定式化するための検討を行う。

(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，スパンなどによって異なり，橋脚の高さ，重量などによって差異がある。また，荷重状態は常時，地震時，風作用および架設時などに分けられるが，一般には地震時における安定計算により，ケーソンの外形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」に示される上・下部構造の設計範囲内で鉛直力(N)，水平力(H)，モーメント(M)の相互関係を表－13および図－35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)-(1)-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 m≦(ケーソン長)≦30 mとした。また，完成



図－34　安定計算における各要因の関係図

表－13　上・下部構造の定式化

上部構造	適用範囲	PC単純桁 幅員(m) 7, 10, 13 支間(m) 20～40 鋼三径間連続桁 幅員(m) 7, 10, 13.5 支間(m) 20～60	下部構造	適用範囲	幅 (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。		形式	ケーソン天端
	支点の組合せ	単純桁 (固定＋可動) CASE1 連続桁 (可動＋固定) (可動) (固定) CASE2 CASE3 CASE4		寸法	各部分の寸法は建設省「土木構造物標準設計」より幅一高さに該当する値を求める。 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。

時のケーソンの単位体積重量(w)は，図－36に示す既往実績によると1.7～2.2 t/m^3の範囲内にあり，平均値として$w=2.0$ 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，前面地盤は粘着力が0である土質，土の水中単位体積重量は1 t/m^3，地盤反力係数比（$K=\bar{K}_V/K_H$）は1～10までの範囲内でとりうるものとした。

また，ケーソン周面地盤は，土質調査資料に基づく地盤構成に応じて，一様地盤から3層地盤まで区分が行われているが，地盤の構成（層厚，土質条件等）を標準化ないしはパターン化することは困難であり，ケーソン外径寸法に影響する機構も複雑となり，主要因が明確に推定できなくなることが予想されるため，周面地盤としては均質な一様地盤とみなすことにした。

(4) 分析のための関係式

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変数はつぎのようになる。

① 設計変数（地震時）

N　：鉛直力

H_1, M_1：橋軸方向水平力，モーメント

H_2, M_2：橋軸直角方向水平力，モーメント

K　：地盤反力係数比

K_{EP}：主働土圧係数（$=f_{(\phi)}$）

q_a　：許容鉛直支持力度

P_a　：許容水平支持力度

ℓ　：ケーソン長

② 制約条件

$q_{11} \leqq q_a$　（橋軸方向底面に対して）

$q_{12} \leqq q_a$　（橋軸直角方向に対して）

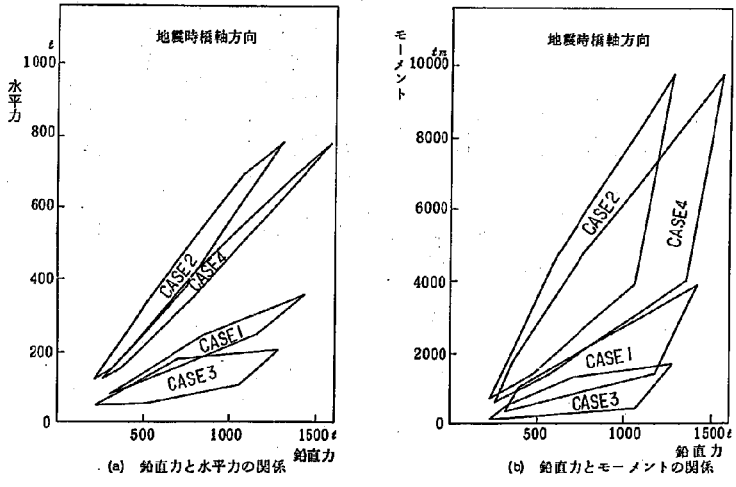
$P_{max1} \leqq P_a$（橋軸方向前面に対して）

$P_{max2} \leqq P_a$（橋軸直角方向に対して）

A_{min}　（底面積最小）

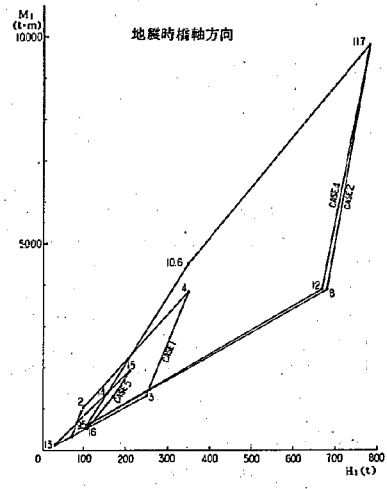
③ 目的変数

a，b（ケーソンの短径，長径の1/2）

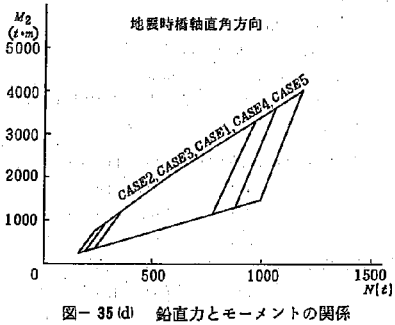


(a) 鉛直力と水平力の関係　　(b) 鉛直力とモーメントの関係

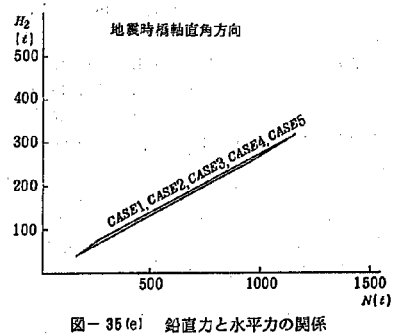
図－35　ケーソン天端に作用する外力の定式化



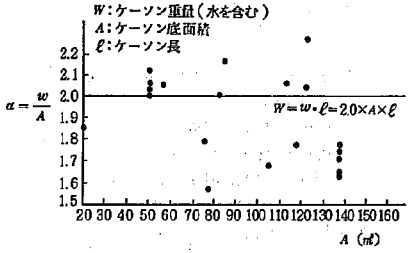
図－35(c)　水平力とモーメントの関係



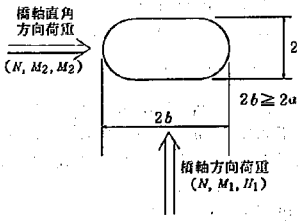
図－35(d)　鉛直力とモーメントの関係



図－35(e)　鉛直力と水平力の関係



図－36　ケーソンの換算単位体積重量α



図－37　作用する荷重

(3) 安定計算の数式上からの検討

本項では，安定計算の数式上から底面積最小を満足するという条件で，設計条件からa，bが求められるかをまず検討する。

(1) 前面地盤反力度からの検討

設計条件が与えられた時，最も簡単な場合の例として，ここでは橋軸方向前面地盤反力度だけが許容値に達し，橋軸直角方向前面地盤反力度および橋軸，軸直角方向の底面地盤反力度とも許容値以内であり（底面は台形分布），回転中心深さは2ℓ以内と考えた場合についてa，bを検討してみる。

$$P_a = \gamma \cdot K_{EP} \cdot h_1/2$$

$$= \frac{\gamma \cdot K_{EP}}{2} \cdot \frac{4\ell^2 \cdot M_1 + 3\ell^3 \cdot H_1 + 8a^3 \cdot \alpha_1 \cdot K \cdot H_1}{(6M_1 + 4H_1 \cdot \ell)\ell}$$

$$P_{max1} = \frac{3(3H_1 \cdot \ell^3 + 4M_1 \cdot \ell^2 + 8\alpha_1 \cdot K \cdot a^3 \cdot H_1)^2}{4b \cdot \ell^3(\ell^3 + 24\alpha_1 \cdot K \cdot a^3)(4H_1 \cdot \ell + 6M_1)}$$

$$\alpha_1 = 1 - 0.411\,a/b$$

$P_{1a} = P_{max1}$ より

$$\frac{\gamma \cdot K_{EP}}{2}\left(4\ell^2 \cdot M_1 + 3\ell^3 \cdot H_1 + 8a^3 \cdot K \cdot H_1 - 3.288\frac{a^4}{b}K \cdot H_1\right)$$

$$\cdot 4b \cdot \ell^3\left(\ell^3 + 24K \cdot a^3 - 3.288\frac{Ka^4}{b}\right)$$

$$-3\ell\left(3H_1 \cdot \ell^3 + 4M_1 \cdot \ell^2 + 8K \cdot a^3 \cdot H_1 - 3.288\frac{a^4}{b}KH_1^2\right)$$

$$= 0 \quad \cdots\cdots (20)$$

これは，a，b については7次式となるが，b についてみると3次式である。

$$
\begin{aligned}
&b^3\{2\ell^2\cdot T\cdot K_{EP}(4\ell^2\cdot M_1+3\ell^2\cdot H_1+8a^3\cdot K\cdot H_1)\\
&\quad(\ell^3+24K\cdot a^3)\}\\
&-b^2\{26.304\ell^2\cdot T\cdot K_{EP}\cdot a^4\cdot K\\
&\quad(H_1\cdot\ell^3+8a^3\cdot K\cdot H_1+\ell^2\cdot M_1)\cdots\cdots\}\\
&+b\ \{2\ell^2\cdot T\cdot K_{EP}(3.288a^4\cdot K)^2H_1+\cdots\cdots\}\\
&-3\ (3.288a^4\cdot K\cdot H_1)^2=0
\end{aligned}
$$

これを b について解き，その解を

$$b=f_1(a,\ M_1,\ H_1,\ \ell,\ K,\ K_{EP})\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

$$A=(\pi-4)a^2+4a^2f_1(a,\ M_1,\ H_1,\ \ell,\ K,\ K_{EP})$$

とすれば，底面積最小という条件式

$$\frac{\partial A}{\partial a}=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

より，$a=f_2(M_1,\ H_1,\ \ell,\ K,\ K_{EP})$となり，これを(21)式に代入して，$b=f_3(M,\ H,\ \ell,\ K,\ K_{EP})$と a，b が求まるが，一般に(21)式は複雑な式となり，(22)式から a を求めるのは非常に困難となる。

2) 底面地盤反力度からの検討

つぎに，橋軸方向前面地盤反力度と底面地盤反力度が同時に許容値に達し，直角方向は前面，底面地盤反力度とも許容値以内（底面は台形分布とする）で，回転中心深さは 2ℓ 以内と考えた場合について a，b を検討してみる。

$$
\begin{aligned}
q_{11}=&\frac{N}{(\pi-4)a^2+4a\cdot b}+\ell\\
&+\frac{3a\cdot K(4H_1\cdot\ell+6M_1)}{b(\ell^3+24K\cdot a^3-9.864a^4/b)}
\end{aligned}
$$

$q_{11}=q_a$ とおくと

$$
\begin{aligned}
&-q_a\{(\pi-4)a^2+4a\cdot b\}\{b(\ell^3+24K\cdot a^3-9.864a^4/b)\}\\
&+N\cdot b(\ell^3+24K\cdot a^3-9.864a^4/b)\\
&+\ell\cdot b\{(\pi-4)a^2+4a\cdot b\}\{\ell^3+24K\cdot a^3-9.864a^4/b\}\\
&+3a\cdot K(4H_1\cdot\ell+6M_1)\{(\pi-4)a^2+4a\cdot b)\}\\
&=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(23)
\end{aligned}
$$

これは，a，b についての6次式となる。

したがって，(20)，(23)式を連立方程式として解くことになるが，目的変数 a，b については，高次の複雑な関係となり，このままで前記変数間の相互関係を把握することはできない。また，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。

(4) 重回帰分析による地盤反力度の回帰式

構造諸元 a，b が設計条件のどういう関数形で表わされるかがわかると，どの設計条件が重要かわかるので，本項ではまず，つぎのような近似式を設定している。

$$P_{max}=\frac{2M}{b\ell^2}+\frac{5H}{3b\ell}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

なお，この近似式は以下にのべる検討事項から抽出したものである。また，この近似式では適用の全領域で近似することができなかったため，この設定した近似式を補正しようと試みる。その補正項としてはどのような項目が考えられるかを，直線近似式から考えられる項，あるいは誤差が K，ℓ，a，b の変化でどう変化するかをグラフより調べて補正項を考え，それぞれの補正項について重回帰分析を行い，最良と考えられる回帰式を設定している。回帰式を設定した条件はつぎの2ケースであるが，円形ケーソンの場合が自動設計成果と比較的合うものと思われる。なお，分析に用いた荷重は，2-(3)-(2)で定式化したものとする。

設定－1 ｛ 小判形ケーソン
荷重状態……*CASE*2

設定－2 ｛ 円形ケーソン
荷重状態……*CASE*1

(1) 設定－1

(a) 回帰分析に用いた設計条件

K ⇒ 1.5，6.0，10.5

ℓ ⇒ 10 m，20 m，30 m，

外力は，*CASE*2（三径間連続梁の固定支承）における境界値とする。

$(M_1,\ N,\ H_1)$⇒	(590$^{t\cdot m}$,	220^t,	110^t)	… ①
	(4510,	600,	350)	… ②
	(9810,	1290,	780)	… ③
	(3900,	1050,	680)	… ④
$(M_2,\ N,\ H_2)$⇒	(220$^{t\cdot m}$,	220^t	40^t)	… ①
	(1510,	600,	120)	… ②
	(3210,	1290,	260)	… ③
	(1160,	1050,	210)	… ④

底面形状

(2a, 2b)⇒	(4^m, 12^m),	(6^m, 12^m),	(8^m, 12^m)	
	(4, 18),	(6, 18),	(8, 18)	
	(4, 24),	(6, 24),	(6, 24)	

したがって，データ数は橋軸方向，橋軸直角方向ともつぎのとおりである。

$3\times3\times4\times9=324$ 個

(b) 橋軸方向前面地盤反力度 P_{max1} の回帰式の設定

(イ) 重回帰分析に用いる項の計算式からの抽出

台形分布の式から

$$P_{max1}=\frac{2M_1}{b\ell^2}\left(\frac{1}{1+24\alpha_1\cdot K\cdot\dfrac{a^3}{\ell^3}}\right)$$

$$+\frac{4H_1}{3b\cdot\ell}\left(\frac{1}{1+24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}}\right)$$

$$+\frac{H_1}{3b\cdot\ell}+\frac{H_1^2}{72b\cdot M_1}\left(\frac{1}{1+\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}}\right)$$

$$+\frac{24H_1^2\cdot\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}}{72b\cdot M_1}\left(\frac{1}{1+\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}}\right)$$

$24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}$, $\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}$ と1を比較して，一方を省略する。

i) $1\gg 24\alpha_1\cdot K\frac{a^3}{\ell^3}$ かつ $1\gg\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}$ の時

$$P_{max1}\fallingdotseq\frac{2M_1}{b\cdot\ell^2}+\frac{5H_1}{3b\cdot\ell}+\frac{H_1^2}{72b\cdot M_1}$$

$$=\frac{2M_1}{b\cdot\ell^2}+\frac{5H_1}{3b\cdot\ell}+\frac{3H_1}{2\times72b\cdot\ell}\times\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}$$

$$\fallingdotseq\frac{2M_1}{b\cdot\ell^2}+\frac{5H_1}{3b\cdot\ell}$$

ii) $1\ll 24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}$ かつ $1\ll\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}$ の時

$$P_{max1}\fallingdotseq\frac{2M_1}{b\cdot\ell^2}\times\frac{1}{24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}}+\frac{4H_1}{3b\cdot\ell}\times\frac{1}{24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}}$$

$$+\frac{H_1}{3b\cdot\ell}+\frac{H_1^2}{72b\cdot M_1}\times\frac{1}{\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}}$$

$$+\frac{H_1^2\times24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}}{72b\cdot M_1}\times\frac{1}{\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}}$$

$$\fallingdotseq C_1\frac{M_1\cdot\ell}{a^3\cdot b\cdot K}+C_2\frac{M_1\cdot\ell}{a^2\cdot b^2\cdot K}+C_3\frac{H_1\cdot\ell^2}{a^3\cdot b\cdot K}$$

$$+C_4\frac{H_1\cdot\ell^2}{a^2\cdot b\cdot K}+C_5\frac{H_1}{b\cdot\ell}+C_6\frac{a^3\cdot K\cdot H_1}{b\cdot\ell^4}$$

$$+C_7\frac{a^4\cdot K\cdot H_1}{b^2\cdot\ell^4}$$

iii) $1\gg 24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}$ かつ $1\ll\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}$ の時

$$P_{max1}\fallingdotseq\frac{2M_1}{b^2\cdot\ell^2}+\frac{4H_1}{3b\cdot\ell}+\frac{H_1}{3b\cdot\ell}+\frac{H_1^2}{72b\cdot M_1}\times\frac{3M_1}{2H_1\cdot\ell}$$

$$+\frac{H_1^2\times24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}}{72b\cdot M_1}\times\frac{3M_1}{2H_1\cdot\ell}$$

$$=C_1'\frac{M_1}{b\cdot\ell^2}+C_2'\frac{H_1}{b\cdot\ell}+C_3'\frac{K\cdot a^3\cdot H_1}{b\cdot\ell^4}$$

$$+C_4'\frac{K\cdot a^4\cdot H_1}{b^2\cdot\ell^4}$$

iv) $1\ll 24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}$ かつ $1\gg\frac{2H_1\cdot\ell}{3M_1}$ の時

$$P_{max1}\fallingdotseq\frac{2M_1}{b\cdot\ell^2}\times\frac{1}{24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}}+\frac{4H_1}{3b\cdot\ell}\times\frac{1}{24\alpha_1\cdot K\frac{a^3}{\ell^3}}$$

$$+\frac{H_1}{3b\cdot\ell}+\frac{H_1^2}{72b\cdot M_1}+\frac{24\alpha_1\cdot K\cdot\frac{a^3}{\ell^3}H_1^2}{72b\cdot M_1}$$

$$\fallingdotseq C_1''\frac{M_1\cdot\ell}{K\cdot a^3\cdot b}+C_2''\frac{H_1\cdot\ell}{K\cdot a^3\cdot b}+C_3''\frac{H_1}{b\cdot\ell}$$

$$+C_4''\frac{K\cdot a^3\cdot H_1^2}{b\cdot M_1\cdot\ell^3}+C_5''\frac{K\cdot a^4\cdot H_1^2}{b^2\cdot\ell^3\cdot M_1}+C_6''\frac{H_1^2}{b\cdot M_1}$$

以上，i)，ii)，iii)，iv) から回帰式の項として考えられるものとして，つぎの《I》群が考えられる。

$$《\mathrm{I}》\begin{cases}\frac{M_1}{b\cdot\ell^2}\ \frac{H_1}{b\cdot\ell}\ \frac{M_1\cdot\ell}{a^3\cdot b\cdot K}\ \frac{M_1\cdot\ell}{a^2\cdot b^2\cdot K}\ \frac{H_1\cdot\ell^2}{a^3\cdot b\cdot K}\\ \frac{H_1\cdot\ell^2}{a^2\cdot b^2\cdot K}\ \frac{a^3\cdot K\cdot H_1}{b\cdot\ell^4}\ \frac{a^4\cdot K\cdot H_1}{b^2\cdot\ell^4}\ \frac{K\cdot a^3\cdot H_1^2}{b\cdot M_1\cdot\ell^3}\\ \frac{K\cdot a^4\cdot H_1^2}{b^2\cdot\ell^3\cdot M_1}\ \frac{H_1^2}{b\cdot M_1}\end{cases}$$

また，直線近似を行った場合の項より考えられるものとして，つぎの《II》群が考えられる。

$$《\mathrm{II}》\begin{cases}\frac{M_1}{b\cdot\ell^2}\ \frac{H_1}{b\cdot\ell}\ \frac{H_1^3\cdot\ell}{b\cdot M_1^2}\ \frac{H_1^2}{b\cdot M_1}\ \frac{H_1\cdot K\cdot a^3}{b\cdot\ell^4}\ \frac{H_1\cdot K\cdot a^4}{b^2\cdot\ell^4}\\ \frac{H_1^3\cdot a^3\cdot K}{b\cdot\ell^2\cdot M_1^2}\ \frac{H_1^3\cdot a^4\cdot K}{b^2\cdot\ell^2\cdot M_1^2}\ \frac{M_1\cdot K\cdot a^3}{b\cdot\ell^5}\ \frac{M_1\cdot K\cdot a^4}{b^2\cdot\ell^5}\\ \frac{H_1^2\cdot K\cdot a^3}{b\cdot\ell^3\cdot M_1}\ \frac{H_1^2\cdot K\cdot a^4}{b^2\cdot\ell^3\cdot M_1}\end{cases}$$

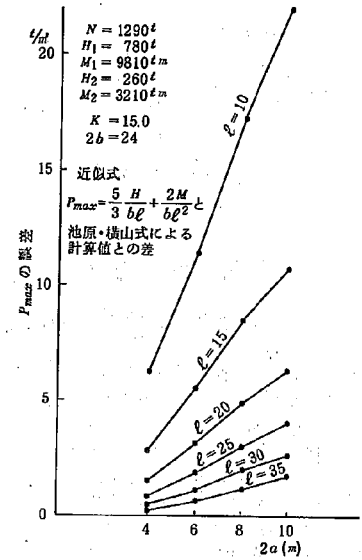
なお，ここで抽出される項の内，$\frac{H}{b\ell}$，$\frac{M}{b\ell^2}$ 以外は物理的意味は考えにくい。$\frac{H}{b\ell}$，$\frac{M}{b\ell^2}$ は底面の抵抗モーメントが0に近い場合（底面の抵抗モーメント $M_0=I_0\cdot K_V\cdot\theta$ であるから，K_V が0に近い場合または I_0 が小さいケーソン）水平力，モーメントの各々が均等にケーソンの前面地盤に作用した時の反力度であり，後述のように本回帰分析において重要な項目となっている。

(ロ) 誤差からの補正項の抽出

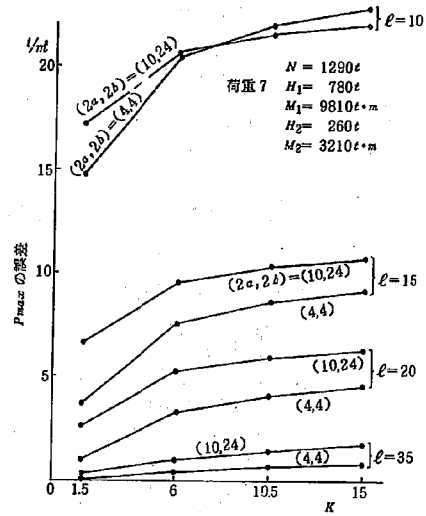
つぎに，前項(イ)の i)の状態での式

$$P_{max1}=2\times\frac{M_1}{b\ell^2}+\frac{5}{3}\times\frac{H_1}{b\ell}$$

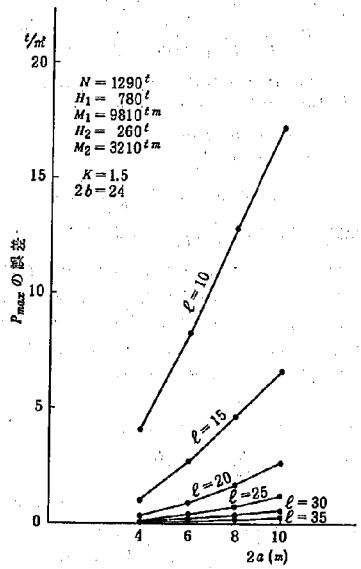
で全領域について計算してみると，池原・横山の式との間に誤差が大きくなり，計算値と合わない領域が生ずる。この領域をどのような項によって補正するか考える。



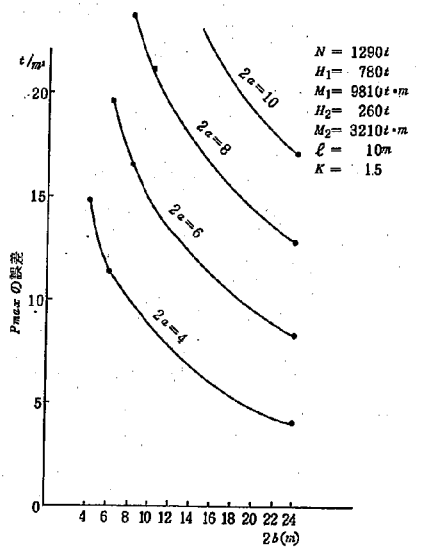
図－38　誤差と側面幅との関係(1)



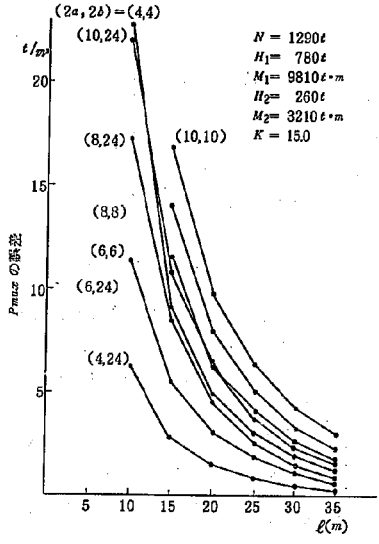
図－40　誤差とKとの関係



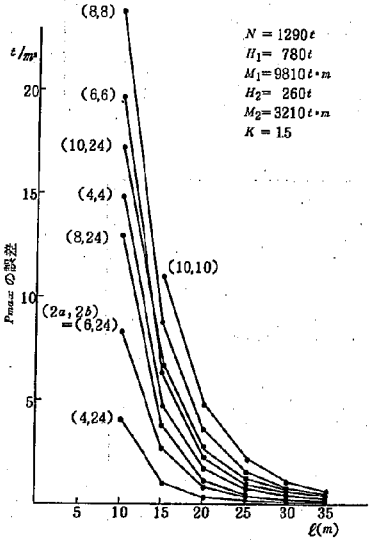
図－39　誤差と側面幅との関係(2)



図－41　誤差と前面幅との関係



図－42　誤差とケーソン長さとの関係(1)



図－43　誤差とケーソン長さとの関係(2)

いま，誤差の絶対値を各変数ごとに整理しグラフ化すれば図－38～図－43のようになる。

したがって，これらのグラフより補正項として，つぎのような《Ⅲ》群が考えられる。

$$《Ⅲ》\begin{cases} -\dfrac{1}{\ell^2} \ -\dfrac{1}{\ell^3} \ -\dfrac{1}{\ell^4} \ -a \ -a^2 \ -b \ -\dfrac{1}{b} \\ -\dfrac{1}{b^2} \ -\dfrac{1}{b^3} \ -\sqrt{K} \ -K \end{cases}$$

また，1つの項で補正しようとすれば，これらの積として，つぎのような《Ⅳ》群が考えられる。

$$《Ⅳ》\begin{cases} \dfrac{Ka}{\ell^3} \ \dfrac{K\cdot a\cdot M_1}{\ell^3} \ \dfrac{K\cdot a\cdot H_1}{\ell^3} \ \dfrac{K\cdot a\cdot H_1}{b\cdot \ell^3} \ \dfrac{K\cdot a\cdot H_1}{b\cdot \ell} \\ \dfrac{K\cdot a\cdot H_1}{b\cdot \ell^2} \ \dfrac{K\cdot a\cdot H_1}{b\cdot \ell^4} \ \dfrac{K\cdot H_1}{b\cdot \ell^2} \ \dfrac{K\cdot a}{b} \ \dfrac{K\cdot a}{b\cdot \ell^2} \ \dfrac{K\cdot a}{b\cdot \ell^3} \\ \dfrac{a\cdot H_1}{b\cdot \ell} \ \dfrac{a\cdot H_1}{b\cdot \ell^2} \ \dfrac{a\cdot H_1}{b\cdot \ell^3} \ \dfrac{a}{b\cdot \ell} \ \dfrac{a}{b\cdot \ell^2} \ \dfrac{a}{b\cdot \ell^3} \ \dfrac{H_1}{b\cdot \ell^2} \end{cases}$$

(ハ) 回帰式の第3項の設定

以上，《Ⅰ》，《Ⅱ》，《Ⅲ》，《Ⅳ》群に示す項を用いて，回帰式を設定することとなるが，回帰式の簡易化を考え

① 項の数は3項までを考える。

② そのうちの2項は，$\dfrac{H}{b\ell}$，$\dfrac{M}{b\ell^2}$ とする。

③ 構造諸元 a，b に関して低次の項とする。

の条件を満足するように設定し，第3番目の項については，R^{*2}（自由度調整ずみの重相関係数の2乗：R^{*2} が変数の増加につれて大きくなる間は，有用な変数が取り込まれたことになり，R^{*2} の増加がとまるようなら，その変数の取り込みは無意味となる）を最大にするような項目をさがすことにした。

(ニ) 橋軸方向前面地盤反力度 P_{max1} を求める回帰式

以上の方針で P_{max1} に対する回帰式を求めると表－14のようになる。

また，回転中心深さ h_1 を求める単回帰式はつぎのようになる。

$$h_1 = \delta_4 + \delta_5 \cdot \ell \quad \cdots\cdots\cdots (R = 0.99088 \text{ である})$$

ただし，$\delta_4 = 0.66271$

$\delta_5 = 0.70971$

したがって，設計条件が与えられた場合の構造諸元 a，b の関係式は，地震時の安全率を1.1と考えればつぎのようになる。

$$b \geqq \frac{1}{\left(\dfrac{1}{2.2}\gamma\cdot K_{EP}(\delta_4+\delta_5\cdot\ell)-\delta_0\right)\ell^2}$$

$$(\delta_1\cdot M_1+\delta_2\cdot H_1\cdot\ell+\delta_3\cdot a\cdot H_1)$$

(c) 橋軸方向底面地盤反力度 (q_{11}) の回帰式の設定

q_{11} の回帰式も P_{max1} と同様の手順によっている。

表－14　P_{max1} の回帰式

回　帰　式	$P_{max1}=\delta_0+\delta_1\frac{M_1}{b\ell^2}+\delta_2\frac{H_1}{b\ell}+\delta_3\frac{aH_1}{b\ell^2}$			
偏回帰係数	$\delta_0=-0.79437$	$\delta_1=1.7279$	$\delta_2=2.3857$	$\delta_3=-5.4291$
95%信頼区間	± 0.13093	± 0.08416	± 0.11132	± 0.31662
重相関係数 $R=0.98959$	寄与率 $R^2=0.97929$	$R^{*2}=0.97909$	分散比 $F=5040.47$	

なお，q_{11}の回帰式を求める場合，台形分布，三角形分布の混在しているデータでは相関が悪かったため，2つの回帰式を設定し精度を上げることにした。

すなわち，q_{11}（台形），q_{11}（三角形）から求めた各々のa，bをq_{21}（台形分布の場合の他縁の反力度）に代入しつぎの判定を行う。

① $q_{21}\geqq 0$の場合，反力度は台形分布とし，q_{11}（台形）によるa，bを求める値とする。

② $q_{21}<0$の場合，反力度は三角形分布とし，q_{11}（三角形）によるa，bを求める値とする。

③ q_{11}（台形）$\Rightarrow q_{21}\geqq 0$，$q_{11}$（三角形）$\Rightarrow q_{21}<0$の場合，精度のよい方の$q_{11}$（台形）による$a$，$b$を求める値とする。

求めた回帰式は，表－15～表－17に示すとおりである。

また，q_{11}（台形）$\leqq q_a$とおけば，構造諸元a，bの関係式はつぎのようになる。

$$b\geqq\frac{1}{q_a-\delta_{11}-\delta_{14}\cdot\ell}\left(\frac{\delta_{12}\cdot K\cdot H_1}{\ell}+\frac{\delta_{13}\cdot N}{a}\right)$$

また，q_{11}（三角形）$\leqq q_a$とおけば，構造諸元a，bの関係式はつぎのようになる。

$$b\geqq\frac{1}{q_a-\delta_{15}}\left(\frac{\delta_{16}\cdot K\cdot M_1}{\ell}+\frac{\delta_{17}\cdot N}{a}+\frac{\delta_{18}\cdot a\cdot K\cdot H_1}{\ell^4}\right)$$

表－15　q_{21} の回帰式

回　帰　式	$q_{21}=\delta_6+\delta_7\ell+\delta_8\frac{H}{ab}+\delta_9\frac{aKH_1}{b}+\delta_{10}\frac{aKM_1}{b\ell}$				
偏回帰係数	$\delta_6=-9.2330$	$\delta_7=1.3471$	$\delta_8=0.16959$	$\delta_9=-0.02118$	$\delta_{10}=-0.02118$
95%信頼区間	± 0.43268	± 0.07127	± 0.02087	± 0.00147	± 0.00431
$R=0.96596$	$R^2=0.93308$	$R^{*2}=0.93152$	$F=599.55$		

表－16　q_{11}（台形分布）の回帰式

回　帰　式	q_{11}（台形）$=\delta_{11}+\delta_{12}\frac{KH_1}{b\ell}+\delta_{13}\frac{N}{ab}+\delta_{14}\ell$			
偏回帰係数	$\delta_{11}=4.5746$	$\delta_{12}=1.1741$	$\delta_{13}=0.31064$	$\delta_{14}=0.89615$
95%信頼区間	± 0.66125	± 0.10578	± 0.03457	± 0.10265
$R=0.96976$	$R^2=0.94043$	$R^{*2}=0.93940$	$F=910.32$	

表－17　q_{11}（三角形分布）の回帰式

回　帰　式	q_{11}（三角形）$=\delta_{15}+\delta_{16}\frac{KM_1}{b\ell}+\delta_{17}\frac{N}{ab}+\delta_{18}\frac{aKH_1}{b\ell^4}$			
偏回帰係数	$\delta_{15}=12.495$	$\delta_{16}=0.12643$	$\delta_{17}=0.87197$	$\delta_{18}=164.77$
95%信頼区間	± 2.695	± 0.01373	± 0.13933	± 39.06
$R=0.96941$	$R^2=0.93976$	$R^{*2}=0.93850$	$F=743.62$	

表－18　P_{max2} の回帰式

回帰式	$P_{max2}=\delta_{19}+\delta_{20}\frac{H_2}{a\ell}+\delta_{21}\frac{M_2\ell}{abK}+\delta_{22}\frac{KH_2}{ab^4}$			
偏回帰係数	$\delta_{19}=0.05779$	$\delta_{20}=0.67671$	$\delta_{21}=0.00125$	$\delta_{22}=18.998$
95%信頼区間	± 0.07079	± 0.03820	± 0.00012	± 4.564
$R=0.96948$	$R^2=0.93988$	$R^{*2}=0.93932$	$F=1667.53$	

表－19　h_2 の回帰式

回帰式	$h_2=\delta_{23}+\delta_{24}\frac{b^3KH_2}{\ell M_2}+\delta_{25}\frac{b^3K}{\ell^2a}+\delta_{26}\ell$			
偏回帰係数	$\delta_{23}=1.9271$	$\delta_{24}=0.32037$	$\delta_{25}=0.86525$	$\delta_{26}=0.57047$
95%信頼区間	± 0.4659	± 0.01357	± 0.05729	± 0.06507
$R=0.98951$	$R^2=0.97912$	$R^{*2}=0.97892$	$F=5000.65$	

表－20　q_{12} の回帰式

回帰式	$q_{12}=\delta_{27}+\delta_{28}\frac{N}{ab}+\delta_{29}\ell+\delta_{30}\frac{KH_2}{b\ell}$			
偏回帰係数	$\delta_{27}=-6.3512$	$\delta_{28}=0.67426$	$\delta_{29}=1.1714$	$\delta_{30}=0.42986$
95%信頼区間	± 0.6629	± 0.03218	± 0.0904	± 0.10484
$R=0.95822$	$R^2=0.91819$	$R^{*2}=0.91742$	$F=1196.99$	

(d)　橋軸直角方向前面地盤反力度 (P_{max2}) の回帰式

P_{max2} の回帰式と回転中心深さ h_2 の回帰式は，表－18～表－19 のとおりとなる。

また，$P_{max2}\leqq P_a$，$P_a=r\cdot K_{EP}\cdot h_2/2.2$ とおけば，構造諸元 a，b の関係式はつぎのようになる。

$$a\geqq\frac{\frac{\delta_{20}\cdot H_2}{\ell}+\frac{\delta_{21}\cdot M_2\cdot\ell}{b\cdot K}+\frac{\delta_{22}\cdot K\cdot H_2}{\ell^4}-\frac{1}{2.2}r\cdot K_{EP}\frac{\delta_{25}\cdot b^3\cdot K}{\ell^2}}{\frac{1}{2.2}r\cdot K_{EP}(\delta_{23}+\delta_{24}\frac{b^3\cdot K\cdot H_2}{\ell\cdot M_2}+\delta_{26}\cdot\ell)-\delta_{19}}$$

(e)　橋軸直角方向底面地盤反力度 (q_{12}) の回帰式

q_{12} の回帰式は表－20 のとおりとなる。

また，$q_{12}\leqq q_a$ とおけば，構造諸元 a，b の関係式はつぎのようになる。

$$b\geqq\frac{1}{q_a-\delta_{27}-\delta_{29}\cdot\ell}\left(\frac{\delta_{28}\cdot N}{a}+\frac{\delta_{30}\cdot K\cdot H_2}{\ell}\right)$$

(f)　回帰式の検討

以上で求めた P_{max1}，q_{11}，P_{max2}，q_{12} の回帰式と池原・横山の式による計算値を比較してみる。結果は図－44～図－47 のとおりであり，比較的よく合致している。

(2)　設定－2

(a)　回帰分析に用いた設計条件

$K\Rightarrow$ 1.5，6.0，10.5

$\ell\Rightarrow$ 10 m，20 m，30 m

外力は，CASE1（単純梁）における境界値とする。

$(M, N, H)\Rightarrow$ ($330^{t\cdot m}$, 310^t, 70^t) …… ①

(1030，410，100) …… ②

(1330，1170，250) …… ③

(3820，1410，350) …… ④

底面形状

$(2a, 2b)\Rightarrow$ (4^m, 4^m), (5^m, 5^m), (6^m, 6^m)

(7，7), (8，8), (9，9)

(10，10)

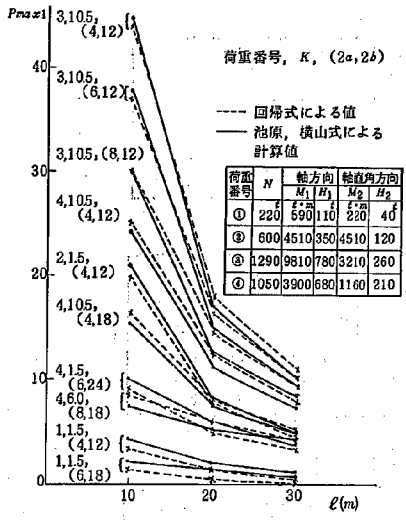
したがって，データ数はつぎのとおりである。

$3\times3\times4\times7=252$ 個

なお，橋軸方向，橋軸直角方向の荷重が等しい場合，橋脚からの制約がなければケーソン形状は円形が望ましいことから，本例では $a=b$ と置き回帰式を求めた。

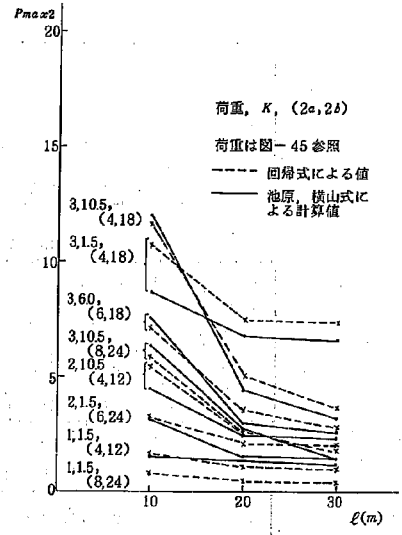
(b)　前面地盤反力度 (P_{max}) の回帰式

回帰分析の手順としては前述と同様であり，結果を

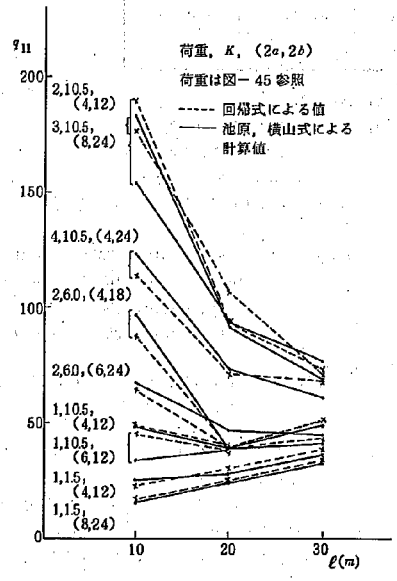


荷重番号	N	軸方向 M_1	軸方向 H_1	軸直角方向 M_2	軸直角方向 H_2
	t	t・m	t	t・m	t
①	220	590	110	220	40
②	600	4510	350	4510	120
③	1290	9810	780	3210	260
④	1050	3900	680	1160	210

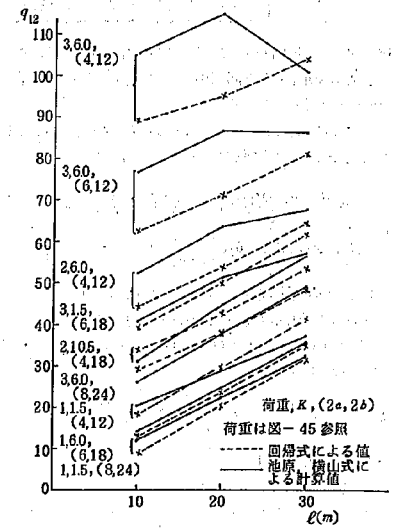
図－44　池原・横山式と回帰式による値の比較
(P_{max1})



図－46　池原・横山式と回帰式による値の比較
(P_{max2})



図－45　池原・横山式と回帰式による値の比較
(q_{11})



図－47　池原・横山式と回帰式による値の比較
(q_{12})

表－21　P_{max} の回帰式

回帰式	$P_{max}=\delta_{31}+\delta_{32}\frac{H}{b\ell}+\delta_{33}\frac{H}{\ell^2}+\delta_{34}\frac{M}{b\ell^2}$			
偏回帰係数	$\delta_{31}=-0.18852$	$\delta_{32}=2.3620$	$\delta_{33}=-5.8626$	$\delta_{34}=1.5385$
95%信頼区間	± 0.20909	± 0.1599	± 0.4407	± 0.1678
$R=0.97968$	$R^2=0.95978$	$R^{*2}=0.95930$	$F=1972.39$	

表－22　q_1 の回帰式

回帰式	$q_1=\delta_{37}+\delta_{38}\frac{KM}{b\ell^2}+\delta_{39}\frac{N}{b^2}+\delta_{40}\frac{KH}{b}$			
偏回帰係数	$\delta_{37}=18.992$	$\delta_{38}=2.1253$	$\delta_{39}=0.45374$	$\delta_{40}=0.01839$
95%信頼区間	± 2.831	± 0.1427	± 0.04380	± 0.01169
$R=0.96525$	$R^2=0.93171$	$R^{*2}=0.93088$	$F=1127.75$	

示せば表－21のようになる。

回転中心深さ h の単回帰式はつぎのようになる。

$h=\delta_{35}+\delta_{36}\cdot\ell$ ……（R=0.97612である）

ただし，$\delta_{35}=-1.5245$

$\delta_{36}=1.4118$

また，$P_{max}\leqq P_a$，$P_a=\gamma\cdot K_{EP}\cdot h/2.2$ とおけば，構造諸元 a，b の関係式はつぎのようになる。

$$b\geqq\frac{\delta_{32}\cdot H\cdot\ell+\delta_{34}\cdot M}{\ell^2\left\{\frac{1}{2.2}\gamma\cdot K_{EP}(\delta_{35}+\delta_{36}\cdot\ell)-\delta_{31}-\delta_{33}\frac{H}{\ell^2}\right\}}$$

(c) 底面地盤反力度 (q_1) の回帰式

q_1 の回帰式は，表－22のようになる。

また，$q_1\leqq q_a$ とおけば，構造諸元 a，b の関係式はつぎのようになる。

$$b\geqq\frac{K(\delta_{38}\cdot M+\delta_{40}\cdot H\cdot\ell^2)}{2\ell^2(q_a-\delta_{37})}+\frac{\sqrt{K^2\cdot(\delta_{38}\cdot M+\delta_{40}\cdot H\cdot\ell^2)^2+4\delta_{39}\cdot N\cdot\ell^4(q_a-\delta_{37})}}{}$$

(d) 回帰式の検討

以上で求めた P_{max}，q_1 の回帰式と池原・横山の式による計算値を比較してみると，図－48～49のようになる。

(5) 回帰式を用いた構造諸元 a，b の検討

本項では，前項において求めた回帰式および構造諸元 a，b の関係式を用いて，これら a，b を求める手順について検討する。

(1) 数式上からの検討

地盤反力度の許容制約条件と底面積最小の条件のもとで，構造諸元 a，b が数式上から求められるか検討を行う。

a) 橋軸方向前面地盤反力度が許容値に達した時

$$\begin{cases}P_{max1}=P_a\\ P_{max1}=\delta_0+\delta_1\frac{M_1}{b\ell^2}+\delta_2\frac{H_1}{b\ell}+\delta_3\frac{a\cdot H_1}{b\ell^2}\\ P_a=\frac{1}{2.2}\gamma\cdot K_{EP}(\delta_4+\delta_5\cdot\ell)\end{cases}$$

より

$$A=(\pi-4)a^2+4a\cdot b$$

$$=(\pi-4)a^2+4a\frac{\delta_1\cdot M_1+\delta_2\cdot H_1\cdot\ell+\delta_3\cdot a\cdot H_1}{\{\gamma\cdot K_{EP}(\delta_4+\delta_5\cdot\ell)/2.2-\delta_0\}\ell^2}$$

ここで，a^2 の係数は

$$(\pi-4)+\frac{4\delta_3\cdot H_1}{\{\gamma\cdot K_{EP}(\delta_4+\delta_5\cdot\ell)/2.2-\delta_0\}\ell^2}<0$$

となるため，A と a のグラフは上に凸となり，$a>0$，$b>0$ の範囲では底面積を最小にする a，b は存在しない。

(b) 橋軸方向底面地盤が許容値に達した時，

(i) 台形分布の場合

$$\begin{cases}q_{11}(\text{台形})=q_a\\ q_{11}(\text{台})=\delta_{11}+\delta_{12}\frac{K\cdot H_1}{b\cdot\ell}+\delta_{13}\frac{N}{a\cdot b}+\delta_{14}\cdot\ell\end{cases}$$

より

$$A=(\pi-4)a^2+\frac{4(\delta_{13}\cdot N-\frac{\delta_{12}\cdot K\cdot H_1\cdot a}{\ell})}{q_a-\delta_{11}-\delta_{14}\cdot\ell}$$

ここで，a^2 の係数は（$\pi-4$）<0 となり，$a>0$，$b>0$ の範囲では，底面積を最小にする a，b は存在しない。

(ii) 三角形分布の場合

$$\begin{cases}q_{11}(\text{三角形})=q_a\\ q_{11}(\text{三})=\delta_{15}+\delta_{16}\frac{K\cdot M_1}{b\cdot\ell}+\delta_{17}\frac{N}{a\cdot b}+\delta_{18}\frac{a\cdot K\cdot H_1}{b\cdot\ell^4}\end{cases}$$

より

$$A=(\pi-4)a^2+\frac{4a}{q_a-\delta_{15}}\left(\frac{\delta_{16}\cdot K\cdot M_1}{\ell}+\frac{\delta_{17}\cdot N}{a}+\frac{\delta_{18}\cdot a\cdot K\cdot H_1}{\ell^4}\right)$$

$$=\left\{(\pi-4)+\frac{4\delta_{18}\cdot K\cdot H_1}{(q_a-\delta_{15})\ell^4}\right\}a^2+\frac{4\delta_{16}\cdot K\cdot M_1}{(q_a-\delta_{15})\ell}a+\frac{4\delta_{17}\cdot N}{q_a-\delta_{15}}$$

$$\frac{dA}{da}=2\left\{(\pi-4)+\frac{4\delta_{18}\cdot K\cdot H_1}{(q_a-\delta_{15})\ell^4}\right\}a+\frac{4\delta_{16}\cdot K\cdot M_1}{(q_a-\delta_{15})\ell}$$

Aはaに関して下に凸のグラフであるから，$\frac{dA}{da}=0$と置くとAを最小にするaが求まるが

$$a=-\frac{\frac{4\delta_{16}\cdot K\cdot M_1}{(q_a-\delta_{15})\ell}}{2\left\{(\pi-4)+\frac{4\delta_{18}\cdot K\cdot H_1}{(q_a-\delta_{15})\ell^4}\right\}}<0$$

となるため，$a>0$，$b>0$の範囲では，底面積を最小にするa，bは存在しない。

(c) 橋軸直角方向前面地盤反力度が許容値に達した時

$$\begin{cases} P_{max2}=P_a \\ P_{max2}=\delta_{19}+\delta_{20}\frac{H_2}{a\cdot\ell}+\delta_{21}\frac{M_2\cdot\ell}{a\cdot b\cdot K}+\delta_{22}\frac{K\cdot H_2}{a\cdot\ell^4} \\ P_a=\frac{1}{2.2}\gamma\cdot K_{EP}\left(\delta_{23}+\delta_{24}\frac{b^3\cdot K\cdot H_2}{\ell\cdot M_2}+\delta_{25}\frac{b^3\cdot K}{\ell^2\cdot a}+\delta_{26}\cdot\ell\right) \end{cases}$$

より

$$a=\frac{\delta_{20}\frac{H_2}{\ell}+\delta_{21}\frac{M_2\cdot\ell}{b\cdot K}+\delta_{22}\frac{K\cdot H_2}{\ell^4}-\frac{1}{2.2}\gamma\cdot K_{EP}\frac{\delta_{25}\cdot b^3\cdot K}{\ell^2}}{\frac{1}{2.2}\gamma\cdot K_{EP}\left(\delta_{23}+\delta_{24}\frac{b^3\cdot K\cdot H_2}{\ell\cdot M_2}+\delta_{26}\cdot\ell\right)-\delta_{19}}$$

であるから，$A=(\pi-4)a^2+4a\cdot b$は，bの6次式となり，極値は存在するが求めることは困難である。

(d) 橋軸直角方向底面地盤反力度が許容値に達した時，

$$q_{12}=q_a$$

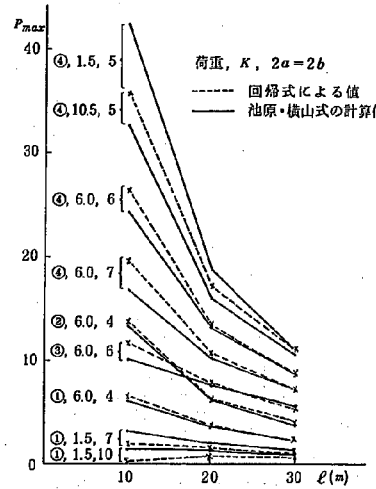
$$q_{12}=\delta_{27}+\delta_{28}\frac{N}{a\cdot b}+\delta_{29}\cdot\ell+\delta_{30}\frac{K\cdot H_2}{b\cdot\ell}$$

より

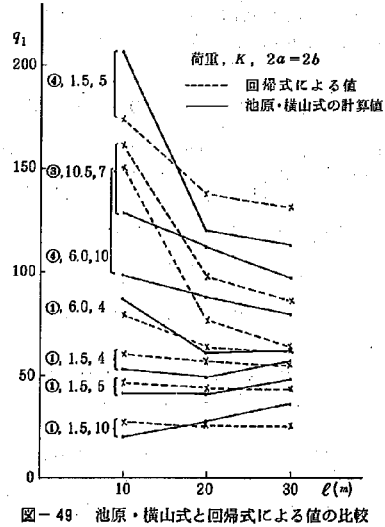
$$A=(\pi-4)a^2+\frac{4\delta_{28}\cdot N+\frac{4\delta_{30}\cdot K\cdot H_2\cdot a}{\ell}}{q_a-\delta_{27}-\delta_{29}\cdot\ell}$$

ここで，a^2の係数は$\pi-4<0$となり，$a>0$，$b>0$の範囲では，底面積を最小にするa，bは存在しない。

以上，最も一般的な状態について数式上から検討を行ったが，結果的にはa，bの推定は不可能である。



図－48　池原・横山式と回帰式による値の比較 (P_{max})

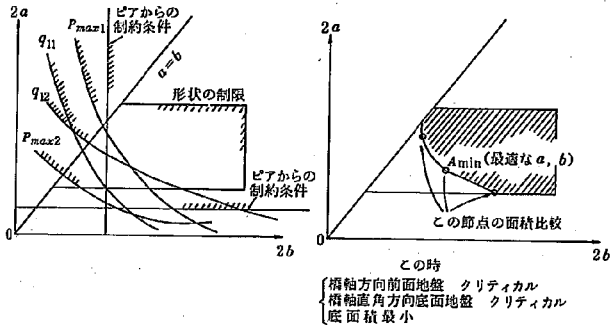


図－49　池原・横山式と回帰式による値の比較 (q_1)

したがって，次項に示す図式解法によることとする。

(2) 図式解法

回帰式を用いた構造諸元a，bの図式解法としては，



図－50　回帰式を用いた図式解法

地盤反力度の回帰式から導いた a，b の関係式を a，b 軸上に表わし，形状比の制限，橋脚からの制約条件，その他をも含めた a，b の取り得る範囲内から，底面積最小の a，b を求める手順が考えられる。

なお，制約条件を a，b の関係式に変形し，a，b 座標面に表わす時，簡単にグラフ化が可能な形にする必要がある。すなわち，$a=f(b)$，あるいは $b=f(a)$ で制約条件の回帰式を変形できればよい。

図式解法による詳細な手順は，次項の計算例にのべるが，その手順は図－50のようになろう。

(3) 図式解法による計算例

図式解法で求めた最適構造諸元 a，b と，自動設計プログラムによる a，b との比較を2例について行った。

a) 例－1

設計条件

$N = 800^t$

$M_1 = 4000^{t\cdot m}$　　$M_2 = 2000^{t\cdot m}$

$H_1 = 450^t$　　$H_2 = 220^t$

$K = 6.0$

$\ell = 20^m$

$K_{EP} = 2.0\ (\phi = 17.5°,\ C = 0)$

$\gamma_s = \gamma_w = 1.0^t/m^3$

$q_a = 200^t/m^2$

(イ) 自動設計の結果

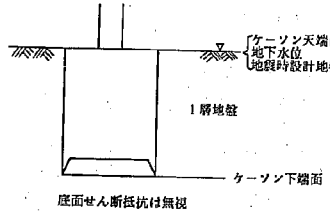
$2b \times 2a = 5.5^m \times 4.0^m$

(ロ) 図式解法

自動設計のアルゴリズムでは，地盤反力係数で側面の分担分20%を含めているため，ここでは

$$\frac{P_a}{1.1} \geq \frac{P_{max}}{1.2}$$

とする。



図－51　設　計　条　件

$P_{max1} \leq P_a$ より

$$b \geq \frac{1.7279\times4000+2.3857\times450\times20+(-5.4291)\times450\times a}{\left\{\frac{12}{1.1}\times\frac{1}{2}\times1\times2\times(0.66271+0.70971\times20)+0.79437\right\}\times20^2}$$

$$\geq 4.173-0.3592a$$

q_{11}（台形）$\leq q_a$ より

$$b \geq 0.893+\frac{1.4}{a}$$

q_{11}（三角形）$\leq q_a$ より

$$b \geq 0.809+\frac{3.72}{a}+0.0148a$$

$P_{max2} \leq P_a$ より

$$a \geq \frac{7.6005+\frac{8.333}{b}-0.01416b^3}{14.5489+0.01153b^3}$$

$q_{12} \leq q_a$ より

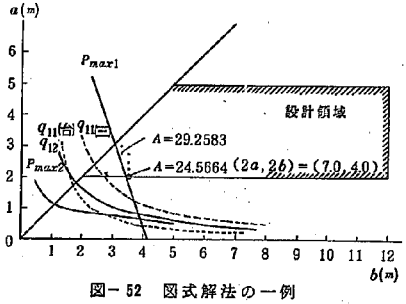
$$b \geq 0.1551+\frac{2.949}{a}$$

これらの関係を示せば図－52　ようになる。

図－52より最適構造諸元は

$2b \times 2a = 7.0^m \times 4.0^m$

となる。



図－52　図式解法の一例

(ハ) 自動設計と回帰式を用いた図式解法との構造諸元の違いについて

以上のように小判形を対象としたこの例では，結果に差が生じたが，これはつぎのような理由によるものと考えられる。

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。このような場合，地盤反力度と許容反力度を関連づけて，設計条件から構造諸元 a，b の関係式を導くと，構造諸元 a，b の変動範囲は当然変化し，変動範囲が拡大するものと考えられる。つまり，地盤反力度の回帰式から構造諸元 a，b の逆推定を行うことは，精度が悪くなる。

b) 例－2

設計条件

$N = 1420^t$

$M_1 = M_2 = 3800^{t \cdot m}$

$H_1 = H_2 = 350^t$

$K = 6.0$

$\ell = 10^m$

$K_{EP} = 2.0\ (\phi = 17.5^\circ\ C = 0)$

$\gamma_s = \gamma_w = 1.0^t/m^3$

$q_a = 200^t/m^2$

(イ) 自動設計の結果

$2b \times 2a = 9.0^m \times 9.0^m$

(ロ) 図式解法

円形の場合は，$a = b$ であるから作図を必要としない。

$P_{max} \leqq P_a$ より

$$b \geqq \frac{2.3620 \times 350 \times 10 + 1.5385 \times 3800}{10^2\left\{\frac{12}{1.1} \times \frac{1}{2} \times 1 \times 2 \times (-1.5245 + 1.4118 \times 10) + 0.18852 + 5.8626 \times \frac{350}{10^2}\right\}}$$

$\therefore b \geqq 4.0972$

$q_1 \leqq q_a$ より

$\therefore b \geqq 3.8218$

$\therefore 2b = 4.0972 \times 2 < 8.5^m$

よって，$2b \times 2a = 8.5^m \times 8.5^m$

(6) 構造諸元と設計変数との回帰式による感度分析

(4)で求めた回帰式は，統計的には重相関係数が0.95以上の極めて良い回帰式であることがわかる。

また，これらの回帰式を用いて設計条件から構造諸元を直接推定する図式解法について検討を行ったが，円形の場合以外は，回帰の逆推定ということで問題点が残る。しかし，構造諸元に対する感度分析の意味からは，非常に役立つと考えられる。すなわち，求める a，b その値には取り得る範囲があるが，設計条件が変化するとその値がどれ位変化するかといった感度分析には有効である。実際の設計において，特に地盤条件は多種多様であり，設計条件としては不確定なものと考えられているが，これらの設計条件から構造諸元 a，b を推定する時，設計者は，これら幅をもつ設計条件の個々の構造諸元に対する感度を知り，感度の良い設計条件に対しては慎重にその値を決定することができる。

したがって，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領域で変化させ，自動設計による累積設計を行い，設計データの蓄積が必要であると考えられる。

〔4〕調査，試験データと設計条件

ケーソン基礎の自動設計では，土質調査および試験結果のデータを設計条件にいかに反映させ入力するかの過程が極めて重要であり，これらのデータの読み誤りは，ケーソンの形状寸法の選定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編）」などでは，土質調査および試験結果に基づく地盤常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 洗掘深さとケーソン天端高

③ 耐震設計上の地盤高の設定

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　地層の区分と地盤反力係数
⑦　周面摩擦力の推定

これらの項目は，土質柱状図や土質試験結果などの資料を基にして，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包含するために，設計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および試験データの設計条件への入力過程ならびに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　土質調査および試験結果の設計条件への移行過程にアルゴリズムが確立していない。

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，経験的に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欠しい。

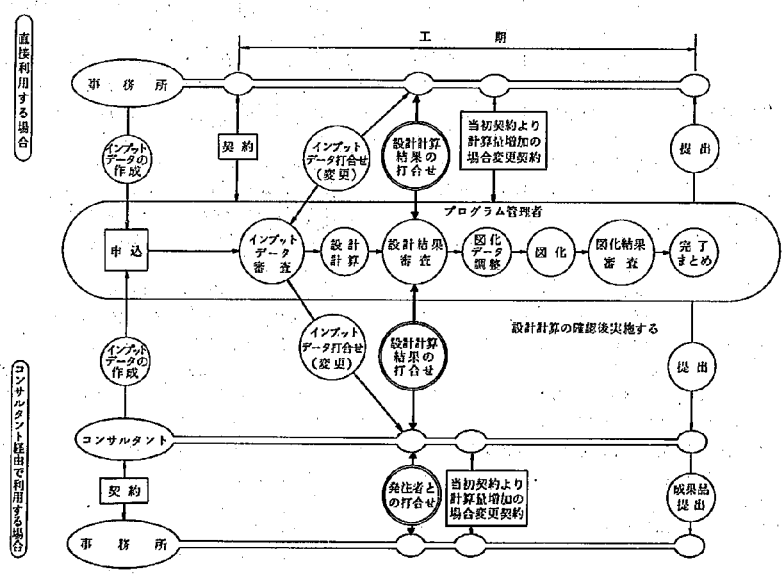
などであり，チェックシステムの自動化のためには，既往実績に対する十分な調査と基礎工学の進歩が前提となる。したがって，現段階では自動設計システムの管理，運営のために基礎構造の専門家によるチエック機関に類するものを設置し，現場に合致した設計を行う必要があり，図－53に示すような利用体系が考えられ，現在試行中である。

3　自動設計プログラムの概要

(1)　プログラムの適用範囲とその規模

本自動設計プログラムの適用範囲はつぎのとおりである。

(1)　型　式　　道路橋ニューマチックケーソン基礎
(2)　ケーソン長　10 m～35 m
(3)　断面形状　　円形，小判形
(4)　外形寸法
　　円形の場合　　直径 4 m～10 m
　　小判形の場合　長径 5 m～24 m
　　短径 4 m～10 m



図－53　ケーソン自動設計プログラム利用の流れ

なお，長径と短径との比を制限することも可能であるが，橋軸方向長さ≦橋軸直角方向長さの制限は設けてある。

また，プログラムの規模はつぎのとおりである。

(1) プログラム言語　　*ALGOL*

(2) ステップ数　　設計計算　8500ステップ
　　図化　　25000ステップ

(3) 使用電子計算機　*CDC*－6600
　　48ビット，99*K*ワード

(4) 演算時間　　設計計算　2～5分／ケース
　　図化　　15～20分／枚

(5) 入力データ

入力データの数は，ケーソン周面地盤の地層区分の数（*N*），周面摩擦力の算定方法（*CASE*）およびプログラムの利用体系が標準形か汎用形かの判別スイッチ（*STYLE*）により，以下の組合せがある。なお，入力データの項目別内訳は，最大の場合2－(3)でのべたとおりである。

（必要データ数）

- *STYLE*＝0（汎用形）
  - *N*＝1
    - *CASE*＝1 …… 78個
    - *CASE*＝2, 3 …… 77個
  - *N*＝2
    - *CASE*＝1 …… 85個
    - *CASE*＝2, 3 …… 84個
  - *N*＝3
    - *CASE*＝1 …… 92個
    - *CASE*＝2, 3 …… 91個
- *STYLE*＝1（標準用）
  - *N*＝1
    - *CASE*＝1 …… 60個
    - *CASE*＝2, 3 …… 59個
  - *N*＝2
    - *CASE*＝1 …… 67個
    - *CASE*＝2, 3 …… 66個
  - *N*＝3
    - *CASE*＝1 …… 73個
    - *CASE*＝2, 3 …… 72個

(6) 出力データ

計算書　　断面諸元，応力度，沈下計算等が約20ページに印刷される。

図　面　　一般図，沈下関係図，各部構造図，鉄筋加工図，刃口金物図，材料表がA1版として，10～25枚に描かれる。

なお，図－68～図－77は本自動設計プログラムによる図化例である。

〔2〕 自動設計の成果と既往設計結果との比較

自動設計プログラムの開発にあたって，その成果と既往設計結果との比較を行っておくことは，プログラムの流れにおいて不明確な部分がないかを検証する上からも重要な作業となる。また，一件設計はその現場の諸々の条件が加味された結果であり，この結果と設計条件との対比，施工性の調査等を行い，それらの成果を取り入れることは，ただ単純に手順の流れに従がう自動設計ではなく，考える自動設計にするためにも必要である。

以下に既往設計例6例をとりあげ，その結果と本自動設計プログラムの成果を比較したものについて示すが，プログラムの開発は，昭和48年度と49年度にかけて行ったので，それぞれの年度における設計結果も併せて記載することにした。

(1) 比較設計例その1

(a) 設計条件

既往設計における設計条件は，図－54のようになっており，自動設計もこれを入力する。

(b) 設計手順

① 初期値の設定

長径，短径の初期値は，施工余裕を0.8 *m*を見込んでつぎのとおりとした。

長径……15.0＋2×0.8＝16.6 *m* ⇒ 17.0 *m*

短径……4.8＋2×0.8＝6.4 *m* ⇒ 6.5 *m*

② 最適ケーソンの選定

本設計例における最適ケーソンの選定は，2－(2)－(2)1)に示す手順に従がい図－55のようになる。

以上で求めたうちから設計対象となるケーソンを底面積の小さな順に並べかえると表－23のようになる。

したがって，21.5 *m*×10 *m*のケーソンがこの設計対象範囲内で底面積最小となり，さらに安全率のバラツキも最小であることから最適解となる。

(c) 比較検討

本設計例における設計結果の比較は，図－62のようになり，両者の面積はつぎのようになる。

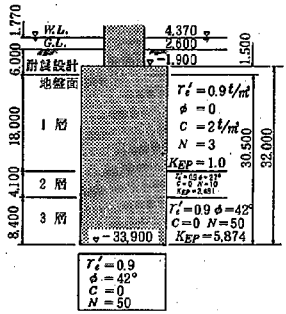
既往設計 ｛外形寸法 24 *m*×8 *m*
　　底面積　A'＝184.01 m^2

自動設計 ｛外形寸法 21.5 *m*×10 *m*
　　底面積　A＝199.01 m^2

したがって，自動設計結果の方が約8％大きくなっている。自動設計では24 *m*×8 *m*では設計不能となるが，この両者の違いは以下に述べるような地盤時根入れ方向の曲げに対する設計アルゴリズムの相違に起因している。

① 本自動設計では，鉛直力*N*としてはケーソン内の水の重量は無視しているが，既往設計ではケーソン内の水の重量を考慮した値としている。したがって，鉛直力は前者よりも大きくなり，断面に生じる応力度は小さくなるように設計されている。

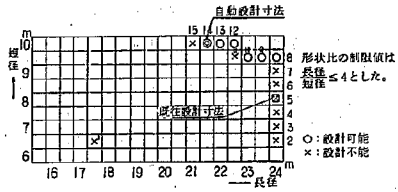
② 一般に深さが変わると鉛直力も変化するので，



地震時ケーソン天端に作用する外力		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N^t	7492.2	7492.2
H^t	3276.9	1798.1
M^{tm}	51319.3	28642.8

$k_h = 0.24$
$k_v = 0$

図－54　設計条件（比較設計例 その1）



番号	安定計算	囲入れ方向の曲げ	説明
① 初期値 17m×6.5m	×	×	6.5×4=27m>24m（上限値）∴24×6.5mで検討
② 24m×6.5m	×	×	長径が上限値に達しているので，短径を0.5m ふやす
③～⑦ 24m×7m ～24m×9m	○	×	上記の繰返し
⑧ 24m×9.5m	○	○	短径9.5mで底面積最小のケーソンかどうか調べるため，長径を0.5mに小さくする
⑨～⑬ 23.5m×9.5m ～23m×9.5m	○	○	上記の繰返し
⑭ 22.5m×9.5m	○	×	短径9.5mで最小ケーソンは23m×9.5m 底面積A=204.848 m²
⑮～⑱ 22.5m×10m ～21.5m×10m	○	○	短径を0.5mふやしA<204.848×1.025のケーソンを調べる
⑲ 21m×10m	○	×	検討終了

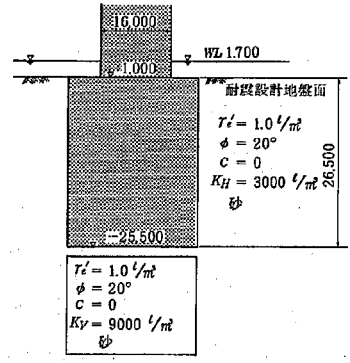
図－55　最適ケーソン選定手順（比較設計例その1）

曲げモーメント最大の位置が必ずしも最大の応力度（σ_θ）を生じるとは限らない。自動設計では最大の応力度を検索して断面設計を行っているが，既往設計では曲げモーメント最大の位置で断面設計を行っている。

表－23　設計対象ケーソンの並べかえ
（比較設計例その1）

番号	ケーソン寸法	底面積m²	底面積による評価	安全率の σ^2	総合評価
⑭	21.5m×10m	199.013	1	0.364	1
⑬	22 ×10	204.113	2	0.407	2
⑩	23 ×9.5	204.848	3	0.452	3
⑫	22.5 ×10	209.213	4	0.457	4

$199.013\ m^2 \times 1.025 = 203.988\ m^2$



地震時ケーソン天端に作用する外力		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N^t	2607.1	2607.1
H^t	1399.99	669.3
$M^{t\cdot m}$	13836.51	6837.83

$k_h = 0.25$（地中の水平震度も0.25）
$k_v = 0$

図－56　設計条件（比較設計例 その2）

(2) 比較設計例その2

(a) 設計条件

既往設計における設計条件は，図－56のとおりである。

(b) 設計手順

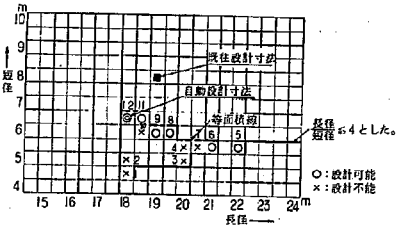
① 初期値の設定

長径……$16^m + 2 \times 0.8^m = 17.6^m \Rightarrow 18^m$

短径……$2.7^m + 2 \times 0.8^m = 4.5^m$

② 最適ケーソンの選定

本設計例における最適ケーソンの選定手順を示せば図－57のようになり，設計対象ケーソンを底面積の小さな順に並べると表－24のようになる。



図－57　最適ケーソン選定手順（比較設計例その2）

表－24　設計対象ケーソンの並べかえ
（比較設計例その2）

番号	ケーソン寸法	底面積m^2	底面積による評価	安全率のσ^2	総合評価
⑨	19 ^{m}× 6 ^{m}	106.274	1	0.046	2
⑫	18 × 6.5	107.933	1	0.039	1
⑥	21 × 5.5	109.008	2	0.063	3
⑧	19.5 × 6	109.274	3	0.050	4
⑪	18.5 × 6.5	111.183	4	0.043	5

表－24の中で底面積最小は⑨であるが，安全率のバラツキは⑫の方が小である。⑫と⑨の面積の差は，

$$\frac{107.933-106.274}{106.274}=0.0156\doteqdot 1.6\% < 2.5\%$$

であるので，最適ケーソン寸法は，18^m×6.5^{m}となる。

なお，本設計例における設計結果の比較は，図－63に示すとおりであり，設計上問題点はなく自動設計が経済的な設計となっている。

(3)　比較設計例その3

(a)　設計条件

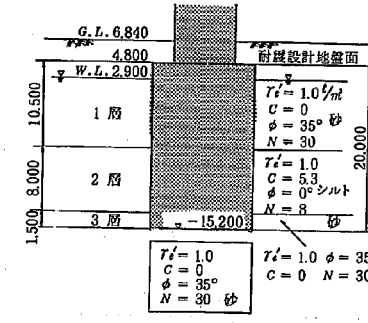
既往設計における設計条件は，図－58のとおりである。

(b)　比較検討

本設計例における設計結果の比較は，図－64に示すとおりである。

既往設計結果は，11.0^m×7.0^{m}であったが，自動設計では48年および49年度の成果とも初期値10.5^m×4.5^{m}で設計は終了した。ただし，部材厚については，48年度の成果よりも49年度の成果の方が大きくなっているが，これは沈下関係の取り扱いの相違によるものである。

既往設計例では，沈下力は沈下抵抗力に対して約400^{t}不足の状態となっており，一方，48年度の成果でも約600^{t}の沈下力が不足することになり，これ



地震時ケーソン天端に作用する外力		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N^t	1721.0	1721.0
H^t	302.0	364.0
M^{tm}	2479.0	3514.0

$k_h = 0.2$
$k_v = 0$

図－58　設計条件（比較設計例 その3）

をケーソン単位面積当りの不足荷重に換算すると，それぞれ約5.4^t/m²，12.9^t/m²となり，48年度の成果では既往設計に比べ附加沈下力を大きくとりすぎている。また，周面摩擦力の算定方法は，ともに土質および深さによって変化する周面摩擦力度を用いているが，プログラム内に組み込んである値（「ケーソン指針」P－50－表－7）と既往設計例の値との間に差があり（プログラムの方が大きい値），比較のためには同一の値となるよう何らの方法で修正する必要がある。以上を考慮して，49年度の成果ではケーソン単位面積当りの不足荷重を附加沈下力として入力した（5.4^t/m²）。したがって，48年度成果よりも側壁，作業室天井床版厚は大となり，コンクリート体積も増加している。また，側壁厚が大きくなったため，シャフトの内空確保の必要から支承の拡幅部のない形状となった。

(4)　比較設計例その4

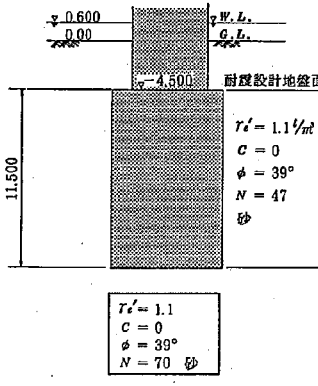
(a)　設計条件

既往設計における設計条件は，図－59のとおりである。

(b)　比較検討

本設計例における設計結果の比較は，図－65に示すとおりである。

既往設計は，9.3^m×6.5^{m}の形状寸法であり，48年度



地震時ケーソン天端に作用する外力		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N^t	1050.0	1050.0
H^t	460.0	180.0
M^{tm}	4700.0	2100.0

$k_h = 0.17$（地中の水平震度も0.17）
$k_v = 0$

図－59　設計条件（比較設計例 その4）

成果は9.5m×4.0mであったが，49年度成果ではさらに小さくなり，9.0m×4.0mとなった。

また，短径が適用範囲の下限値4.0mとなっておりさらに，ケーソン躯体長も短い関係で支承部ハンチのない形状となった。

なお，ここで48年度の成果において長径寸法が9.5mとなったのは，隔壁1枚を設定するプログラムの一部に誤りがあったためで，48年度の成果でも9.0m×4.0mで設計可能となる。

(5)　比較設計例その5

(a)　設計条件

既往設計における設計条件は，図－60のとおりである。

(b)　比較検討

本設計例における設計結果の比較は，図－66に示すとおりである。

既往設計がφ6.0mの円形であることから，初期値φ5.0mとして計算した結果，48年度および49年度の成果は，それぞれφ5.5m，φ5.0mで設計が終了した。

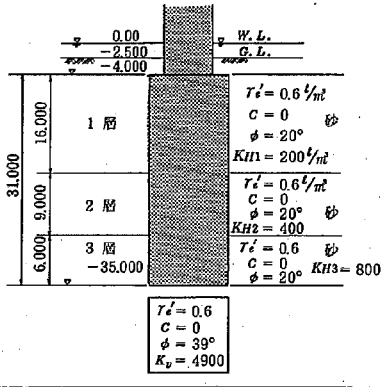
ケーソン寸法が小さくなったのは，支承部連絡筋の計算アルゴリズムの修正により，必要鉄筋量が減少したためであるが，同時に側壁厚が増しコンクリート体積も増加した。これは，ケーソン外径寸法が小さくなったため，地震時根入れ方向の曲げに対して部材厚を1.1m必要とする結果である。

表－25　自動設計結果と既往設計結果との比較

例	ケーソン主要諸元	既往設計	自動設計	自動設計/既往設計
設計例その1	ケーソン寸法	24m×8m×32m	21.5m×10m×32m	
	ケーソン底面積 m^2 A	184.01	199.01	1.082
	コンクリート体積 m^3 Yc	3,443.5	3,039.4	0.883
	施工時沈下力 t W	8,732.0	9,564.4	1.095
	施工時沈下抵抗力 t F	8,732.0	9,630.0	1.103
	沈下力/沈下抵抗力 = W/F	1.000	0.993	——
設計例その2	ケーソン寸法	19m×8m×26.5m	18m×6.5m×26.5m	
	ケーソン底面積 m^2 A	143.01	107.93	0.755
	コンクリート体積 m^3 Yc	1,539.4	1,189.7	0.773
	施工時沈下力 t W	4,985.0	4,052.9	0.813
	施工時沈下抵抗力 t F	5,189.0	3,551.4	0.684
	沈下力/沈下抵抗力 = W/F	0.961	1.141	——
設計例その3	ケーソン寸法	11m×7m×20m	10.5m×4.5m×20m	
	ケーソン底面積 m^2 A	71.54	44.22	0.618
	コンクリート体積 m^3 Yc	788.1	596.0	0.756
	施工時沈下力 t W	2,232.8	1,594.3	0.714
	施工時沈下抵抗力 t F	2,620.0	1,894.9	0.723
	沈下力/沈下抵抗力 = W/F	0.852	0.841	——
設計例その4	ケーソン寸法	9.3m×6.5m×11.5m	9m×4m×11.5m	
	ケーソン底面積 m^2 A	54.02	34.85	0.645
	コンクリート体積 m^3 Yc	376.33	288.9	0.768
	施工時沈下力 t W	951.6	703.1	0.739
	施工時沈下抵抗力 t F	1,684.6	1,300.7	0.772
	沈下力/沈下抵抗力 = W/F	0.565	0.541	——
設計例その5	ケーソン寸法	6m×6m×31m	5m×5m×31m	
	ケーソン底面積 m^2 A	29.22	20.43	0.699
	コンクリート体積 m^3 Yc	431.8	428.1	0.991
	施工時沈下力 t W	1,430.0	1,189.5	0.838
	施工時沈下抵抗力 t F	2,160.0	1,551.4	0.749
	沈下力/沈下抵抗力 = W/F	0.662	0.767	——
設計例その6	ケーソン寸法	25m×7m×21m	24m×5.5m×21m	
	ケーソン底面積 m^2 A	170.32	130.97	0.769
	コンクリート体積 m^3 Yc	1,800.1	1,445.2（隔壁4枚）	0.803
	施工時沈下力 t W	5,334.6	4,325.5	0.811
	施工時沈下抵抗力 t F	5,394.4	4,265.6	0.791
	沈下力/沈下抵抗力 = W/F	0.989	1.014	——

(6)　比較設計例その6

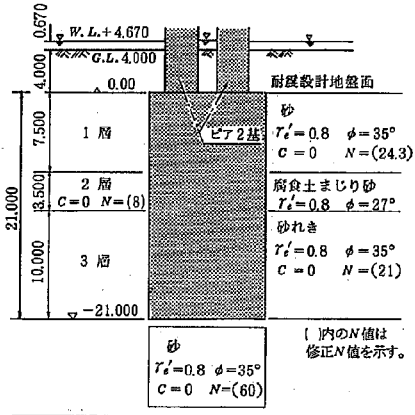
(a)　設計条件



地震時ケーソン天端に作用する外力		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N^t	935.0	935.0
H^t	301.0	225.0
M^{tm}	2820.0	2601.0

$k_h = 0.24$
$k_v = 0$

図－60　設計条件（比較設計例 その5）



地震時ケーソン天端に作用する外力		
	橋軸方向	橋軸直角方向
N^t	3724.8	3724.8
H^t	1557.6	789.6
M^{tm}	20895.0	11534.6

$k_h = 0.2$（水平震度）
$k_v = 0$　（鉛直震度）

図－61　設計条件（比較設計例 その6）

既往設計における設計条件は，図－61のとおりである。

(b)　比較検討

本設計例における設計結果の比較は，図－67に示すとおりである。

このケーソン基礎は，設計条件に示すように7.5m×3.5mの小判形橋脚を2基支えるため，橋軸直角方向外径寸法は極めて大きくなり，既往設計結果では25mとなっており，本自動設計の適用範囲の上限値（24m）を超える。したがって，自動設計では長径の初期値を24mとし，短径については5.5mを初期値として設計した。また，隔壁枚数については3枚および4枚の2ケースについて設計するものとしたが，結果は初期値で決っている。なお，自動設計結果が偏平な形状になったのは，形状比の制限値（長径／短径）を5としたからである。

(7)　比較設計例のまとめ

以上6例の比較設計についてのべたが，これらをまとめてみると表－25のようになり，自動設計結果は既往設計に比べ，ケーソン寸法が小さく，かつ経済的に設計できる。

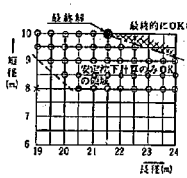
〔3〕　48年開発プログラムの問題点とその処理

前述のように本自動設計プログラムは，昭和48年，49年度に開発を行っているが，昭和48年度に開発を行った時点で既往設計との比較を行い，プログラムの妥当性あるいは問題点の抽出について検討を行った。表－26に示す事項は，その検討によって生じた問題点とその処理についてまとめたものであり，49年度の拡張作業において修正している。なお，本自動設計プログラムにおいても最終的な完成品とするには，多くの設計に利用され問題点の抽出とその改良の積み重ねに待つことが多く，今後もメインテナンスは続けて行く必要がある。

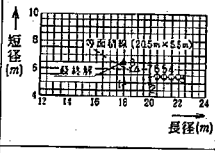
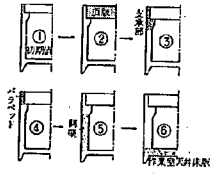
4　あとがき

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故である。そして以来，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。しかも，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

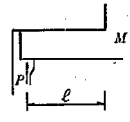
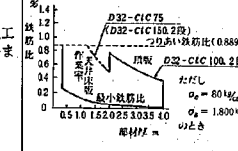
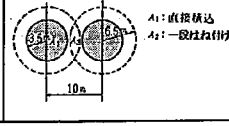
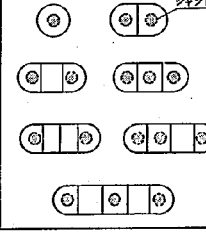
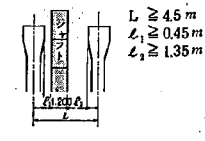
表－26(a)　プログラムの修正事項

項　　目	48年開発プログラム上での処理	問　　題　　点	49年拡張プログラム上での処理
附加沈下荷重	附加沈下荷重を考慮して設計する場合は附加沈下荷重のトータル(Wt)値をインプットする。	ケーソン寸法（長径，短径）が未定の段階では附加沈下荷重のトータル量は決められない。	附下沈下荷重を考慮して設計する場合は単位面積当りの荷重値（w t/m²）をインプットする。したがって附加沈下荷重のトータル量はケーソン面積に比例する。 ケーソン自重による沈下を原則として設計する場合 $w=0$ とインプットする。
隔壁の枚数およびその位置	隔壁枚数は最大2枚までとする。 円型　なし 小判型 長径 8 m まで　なし 長径 16 m まで　1枚 長径 16.5 m 以上　2枚	隔壁枚数を左記のように設定したためケーソン御壁水平断面，作業室天井床版，吊桁が設計不能となる場合が生じる。 また隔壁枚数は構造計算のみで，なく，施工性（シャフト本数，沈下力）をも考慮して決めるのが望ましい。	隔壁枚数は最大4枚きでとした。 隔壁枚数についてはケーソン寸法（長径，短径），シャフト内空確保を考慮し，また応力状態に応じて選択できるようにした。 隔壁位置については応力計算上，隔壁部の曲げモーメントが最小となるように設定する。 ケーソン寸法が未定の段階では隔壁枚数もまた未定であるので設計者は以下の判断のスイッチをたてる。 KAZU＝1　隔壁枚数を少なくして設計する。 KAZU＝2　隔壁枚数を多くして設計する。 KAZU＝3　上記両方とも計算し，その結果をみて判断する。
地震時根入れ方向曲げの計算	この計算はプログラム上では応力計算のブロックで行なっている。すなわち48年開発安定沈下計算を満足するケーソン寸法（a_0, b_0）は，地震時根入れ方向の曲げモーメントに対してケーソン水平断面の断面二次モーメントは足りるものと想定している。 前記比較設計例その1の場合  	設計条件によっては（特に地盤定数を過大に見つもった場合），安定，沈下計算を満足する寸法（a_0 b_0）と，最終的なケーソン寸法（a，b）とがかなり異なることがある。 （例）比較設計例その1の場合 （a_0, b_0）＝（20.5，8） （a，b）＝（21.5，10） この場合，48年開発プログラムでは（a_0，b_0）から（a，b）までの間に存在するケーソンについて（約40ケ），一つづつ検討していくためランタイムはきわめて長くなる。（約1時間）	安定，沈下計算を満足するだけでなく，根入れ縦方向の曲げに抵抗できる断面二次モーメントを有するケーソン寸法が設計対象ケーソンとして扱われる。 設計対象ケーソンは主として二分法で求めており，収束は早い。 （左記の例では，約2分で設計計算が終了する）。 したがって設計条件によるランタイムは1ケースにつきほぼ2～3分の範囲内である。
設計対象ケーソンの選択基準および選択手順	ケーソン選択基準は底面積最小という条件とする。したがって与えられた条件の中で，安定沈下計算を満足する底面積最小のケーソンをとり出し，他のケーソンはクリアーしている。	底面積は最小値Aminより数多大であるが，設計可能となるケーソン群が存在する場合がある。（左下図△印） 底面積が最小であっても安定計算上の安全率　（許容支持力／地盤	ケーソン選択基準は底面積と安定計算上の安全率（構軸方向，直角方向，前面，底面）とする。 すなわち，安定，沈下，応力計算をすべて満足するケーソン群の中から最小底面積Aminを取り出し

表－26(b)　プログラムの修正事項

項目	48年開発プログラム上での処理	問題点	49年拡張プログラム上での処理
設計対象ケーソンの選択基準および選択手順	下図の例では安定沈下計算を満足する底面積最小ケーソンは20.5 m×5.5 m（ただし，この寸法では断面二次モーメントが不足）であり，3, 4, 5はクリアーされている。 比較設計例その2の場合  	反力度）のばらつきが大であったり，また構造計算上，きわめて不利な形状を選択する場合もある。したがって底面積の差が小さいときには別の選択基準を導入する必要がある。 （例） 左図の場合 Amin＝106.258m²（20.5m×5.5m） A_1　＝106.274　（19m×6m） A_2　＝107.933　（18m×6.5m）	A≦1.025 Amin のケーソンについては，底面積について同等の評価を下し（底面積の差は十分無視できるものとみなす），その中から安全率のばらつきの小さい順にランクづけをし，設計対象ケーソンとしてひろい出す。 なお最終的な解（A≦1.025Amin σ^2，σ^2_{min}）以外にも設計可能な一連のケーソン寸法もアウトプットすることとした。
平面寸法の変更	安定沈下計算を満足する寸法を見つけ出すまでの手順は前項選択基準の例に示したように，長径と短径の比の制限値および等面積線を基準として求めている。 また，安定，沈下計算を満足するケーソン寸法（長径＝ai，短径＝bi，底面積＝Ai）を設計可能なケーソンとみなして次の手順に進んでいるため，応力計算で設計不能となる場合は A＞Ai　でかつ底面積最小 という条件でケーソンを1つ選択してくる。 したがって安定，沈下計算を満足するケーソン寸法の領域とすべての条件を満足するケーソン寸法の領域が離れている場合，最終解に達するまでその中間領域のケーソンすべてについて設計計算を行なっている。	平面寸法の変更をするとき，その変更する理由（例えば安定計算の場合なら，軸方向，直角方向のいずれが原因か，また底面か前面のいずれが原因か等）によって変更したい寸法のきざみ巾を変化させる必要がある。 すなわち最終的に設計可能なケーソン寸法を早く見つけ出し，詳細設計はそれらについてのみ行えばよい。	設計可能な領域を早く見つけ出すために，左記の変更理由に応じて数種類のルーチンに分岐させた。 また一般に自動設計では許容値いっぱいの設計をおこなうため，精算した場合に設計不能となる場合も考えられる。 その場合には，最初に求めた設計対象ケーソン群の中から次位のランクのものを選択し，改めて詳細設計に入るようにした。
応力計算　計算手順	 	ある部材の断面算定をするとき，他の部材寸法は固定した状態で計算をおこない，部材厚の変更巾（きざみ巾）は常に正としているため，側壁厚をふやすと作業室天井床版のスパンは小となり，またパラペット厚が変わらなければ，頂版受部の面積は大きくなる。このようにある部材厚を変更した場合，他の部材の断面算定にも影響する。したがって，ケーソン各部材厚を最小とするためには応力度計算の手順についても考える必要がある。	①　初期値 ②　側壁（水平方向，縦方向）の計算 ③　頂版 ④　支承部 ⑤　パラペット ⑥　作業室天井床版 （以下省略）の順とする。
応力計算　支承部連結筋の計算	支承部連結筋は支承部面に作用するM，Nに対して鉄筋を無視した断面二次モーメントで求めた引張力の合力に抵抗できるようにする。 $\sigma_t = \frac{N}{A} - \frac{My}{I}$ （報告書－1 P87～P88参照）	過大設計となり，また側壁縦筋との整合性がなくなる。	支承部面をM,Nを受ける中空小判型鉄筋コンクリート断面とみなす。

表－26 (c) プログラムの修正事項

項目		48年開発プログラム上での処理	問題点	49年拡張プログラム上での処理
鉄筋	鉄筋量	頂版の最大鉄筋量はD 32－c/c 150　2段配筋とする。  作業室天井床版は2段配筋まで可とする。	頂版の計算方法より，ピアーとの離れが大きくなると，曲げモーメントが大になり，設計不能となる場合がある。とくに，せん断力に対しては十分である場合，頂版厚にみあった鉄筋量をとる必要がある。 作業室天井床版の2段配筋は施工上問題があり，1段配筋筋が好ましい。	一般にケーソン部材厚はかなり大きいので頂版，作業室天井床版の鉄筋量の上限値をふやしても与えられた断面のつりあい鉄筋比（σ_c, σ_s がともに許容値 σ_{ca}, σ_{sa} に達する場合の鉄筋比）にはまだかなり余裕がある。したがって最大鉄筋量は下図のようにふやす。 
	鉄筋径	鉄筋量が最小であればよい。すなわち加工筋の径の調整はしない。	太径のスターラップ等の加工筋は加工，組立上問題がある。ただし加工筋でもリング筋のような滑らかな曲率をもつものは，鉄筋径が大であっても，強度上は問題なくまた鉄筋加工装置の発達により加工も便利になっているので組立作業にのみ影響するものと思われる。	スターラップは最大でD 19とし，配筋間隔で調整する。 側壁水平筋は原則としてD 25までとする。ただし多量の鉄筋が必要な場合で配筋間隔が150mm以下にしてもなお太径が必要な場合については後の調整は行わない。
部材厚		既往施工実績の調査に基づきケーソン各部材厚の最小値最大値を設定した。作業室天井床版についてはその最大値を1.5 mとした。	適用範囲内のケーソンでは十字型隔壁を設けることが困難である。したがって10 m×10 mに近い円形ケーソンに大きな荷重（主として地盤反力度）が作用する場合，左記の範囲内では設計不能となる場合がある。	作業室天井床版厚の上限値は2.0 mとした。 ただし，せん断応力度のみが許容値を超える場合，あるいは沈下関係から断面をふやす場合の上限値は既往の上限値1.5 mをとる。前者の場合はスターラップを用いて断面は1.5 m以下とする。
隔壁枚数の変更		隔壁枚数はケーソン寸法に応じて一通りに固定している。 したがって隔壁枚数の変更は考慮していない。	側壁水平方向の設計のみが不能となる場合，隔壁枚数をふやせば設計可能となる。	隔壁枚数を少なくして設計する場合でも（KAZU=1），側壁水平方向が設計不能になったら，自動的に隔壁枚数をふやす。 ただし隔壁枚数をこれ以上ふやせない場合はこのルーチンを通らない。
シャフト本数およびその位置		既往施工実績の実態調査に基づきシャフト本数は以下のようにして決める。 ①ケーソン底面積　A A＜75 m² ……1本 75≦A＜150 m² ……2本 A≧150 m² ……3本 ②シャフト中心間隔は10 m 以下とする。  	隔壁枚数の設定方法が変わったので左記の本数を配置する標準的なアルゴリズムを設定する必要がある。  	シャフト本数の決め方は既往のアルゴリズムにしたがう。 シャフトの位置の決め方 ①シャフト1本当りが対象とする面積ないしは最大離れを等しくする。 ②支承部内面との離れを最小でも45cm は確保する。 

表－26(d)　プログラムの修正事項

項目		48年開発プログラム上での処理	問題点	49年拡張プログラム上での処理
シャフト本数およびその位置		③隔壁1枚のときはシャフト2本とする。 以上のアルゴリズムに基づきシャフト本数を決定する。ただし非対称の配置はしない。		なお，シャフトは非対称の配置となる場合も考慮している。
インプットデータ数（設計計算のための）		最小で52　（1層地盤の標準タイプのとき） 最大で92　（3層地盤の特殊タイプのとき） ここで標準タイプとは，材料の重量，許容応力度等が一般的な場合をさす。	設計者の判断を忠実に反映した設計およびプログラムの汎用性を考慮すると定数としてプログラム内に組込めるインプットデータ数はせいぜい十数個でしかない。またインプットデータ数が多少減ってもインプットの形式が複雑になることは避けた方がよい。	最小で59，最大の場合で92である。左記の理由からインプットデータの作成形式を合理的にすることに重点をおいた。
アウトプット	設計不能の場合	"設計不能"というコメントだけが打ち出される。	設計不能の原因および諸計算結果も打ち出す方がよい。	諸計算結果も打ち出し，設計者の判断にゆだねる。
	設計対象ケーソン	自動設計で最適としたケーソン1組だけが打ち出される。	自動設計で選択したケーソンが設計者にとって不都合な場合，判断資料が得られない。	一連の設計対象ケーソンが打ち出される。したがって自動設計結果とは別のケーソンで設計したい場合は，その中から設計者が抽出して再度計算すればよい。
	シャフトの位置および隔壁位置	設計計算書ではシャフトの位置は求めていない。（図面を書くときに決定する）	シャフトの本数，位置および隔壁の枚数位置も設計計算書の中に示す必要がある。	設計計算書の中に明示する。ただしシャフトの本数，位置を設計者の判断で変更することも可能とした。
	説明（コメント）		既往プログラム設計計算書はコメントが少いのでマニュアルと対比させないと理解しにくい。	なるべくコメントを加え，マニュアルなしでもわかるように改良した。

求される論理性がわれわれ人間の考え方にも影響を与えるようになってきた。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わけであるが，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，機械が迫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。

本研究においても，不確定要素の多いニューマチックケーソン基礎の自動設計の開発に際して，その合理化を図ることを目的としたことから次の成果を得た。

① 最適設計のための設計目標を，経済性および基礎の安定性の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，既往実績にもとづく検討を加え，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図った。

③ 自動設計プログラムによる設計結果と既往設計結果との比較を行ったが，ケーソン基礎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，調査または試験データの設計条件への入力過程およびアウトプットに対してチエックシステムが必要とされているが，チエ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，今回の研究も上・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，ケーソン基礎工事における止水壁高が増加する傾向にあり，その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ーケーソンが出現しているが，当システム課ではこれらの自動設計も

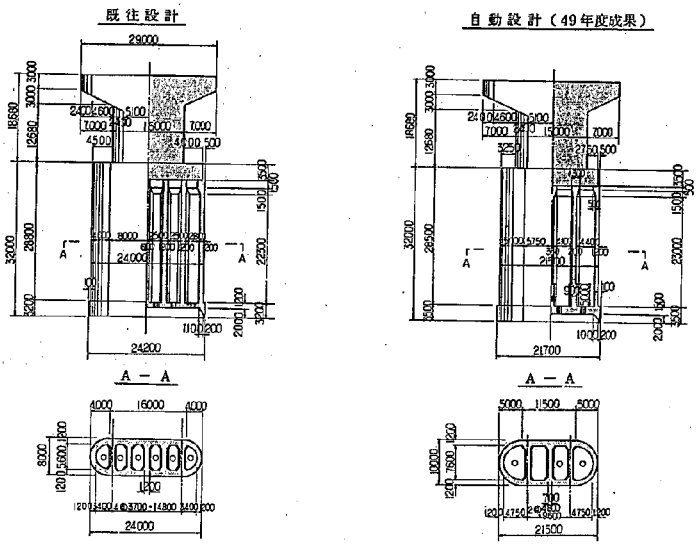
続けて開発している。

なお，本自動設計システムは「ニューマチックケーソン自動設計委員会」〔委員長，吉田厳，（48年度）および浅間達雄（49年度）〕によって承認されたものであるが，その設計アルゴリズムの審議にあたっては委員諸氏には貴重な御意見，御指導を賜った。ここに厚く御礼申しあげる次第である。

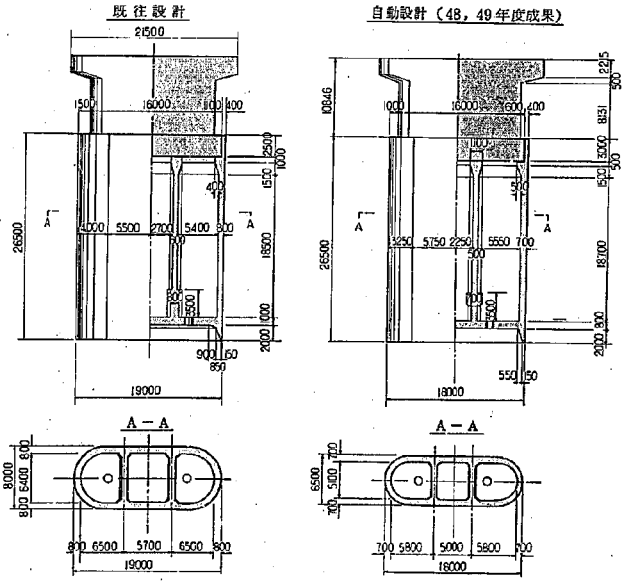
参考文献

1) 労働省令：高気圧障害防止規則
2) 建設省：建設省制定土木構造物標準設計第6～12巻，
3) 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編など関連の設計指針
4) 土木学会：土木製図基準
5) 岩松：土木設計と電子計算，橋梁 Vol. 8 No. 11
6) 池原・横山：水平力を受けた井筒の安定計算について，土木学会誌，Vol. 38－12
7) B. W. Balch and C. J. Huang（中村慶一訳）：応用多変量解析，森北出版

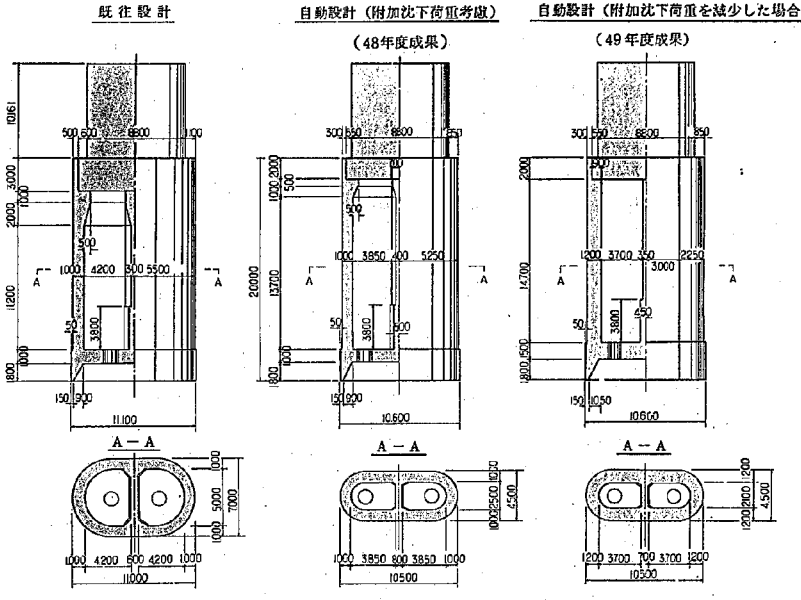
（昭和52年1月20日原稿受理）



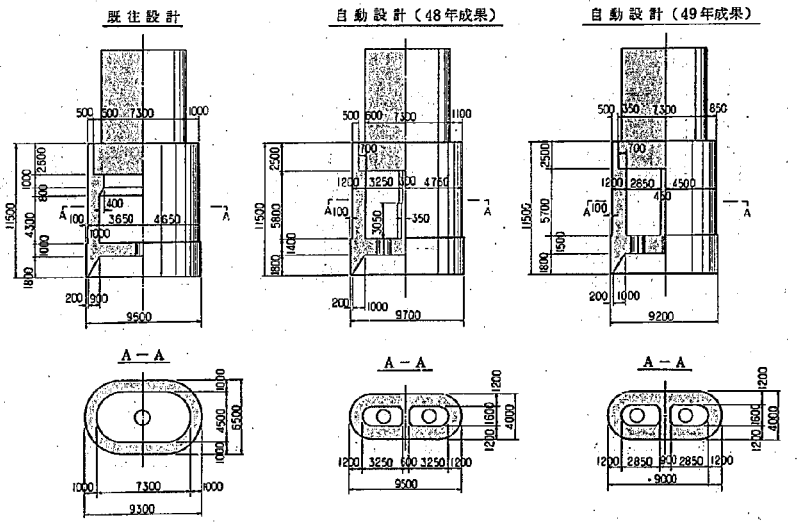
図－62　設計結果の比較（比較設計例 その1）



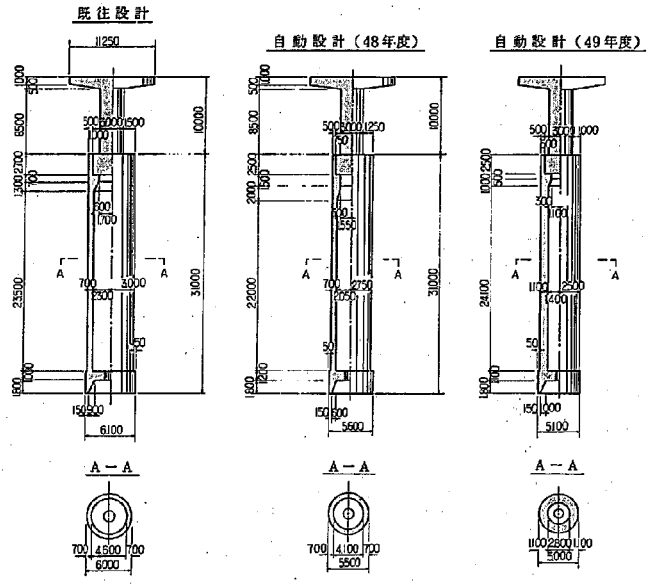
図－63　設計結果の比較（比較設計例 その2）



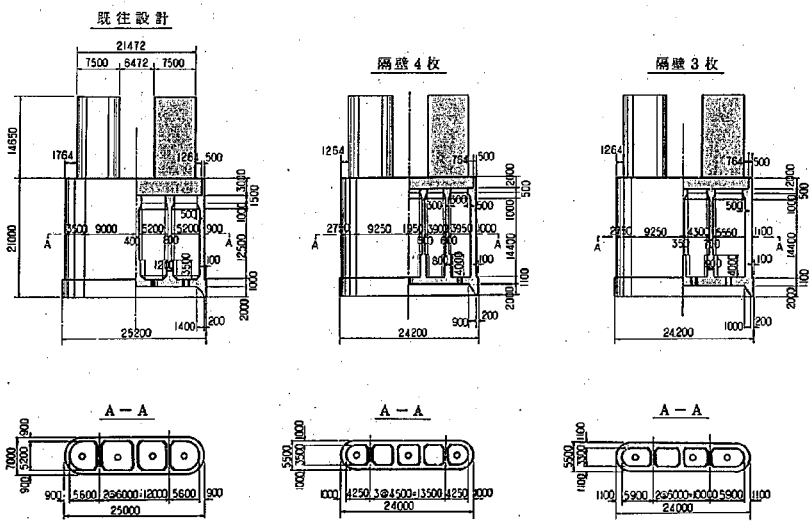
図－64　設計結果の比較（比較設計例 その3）



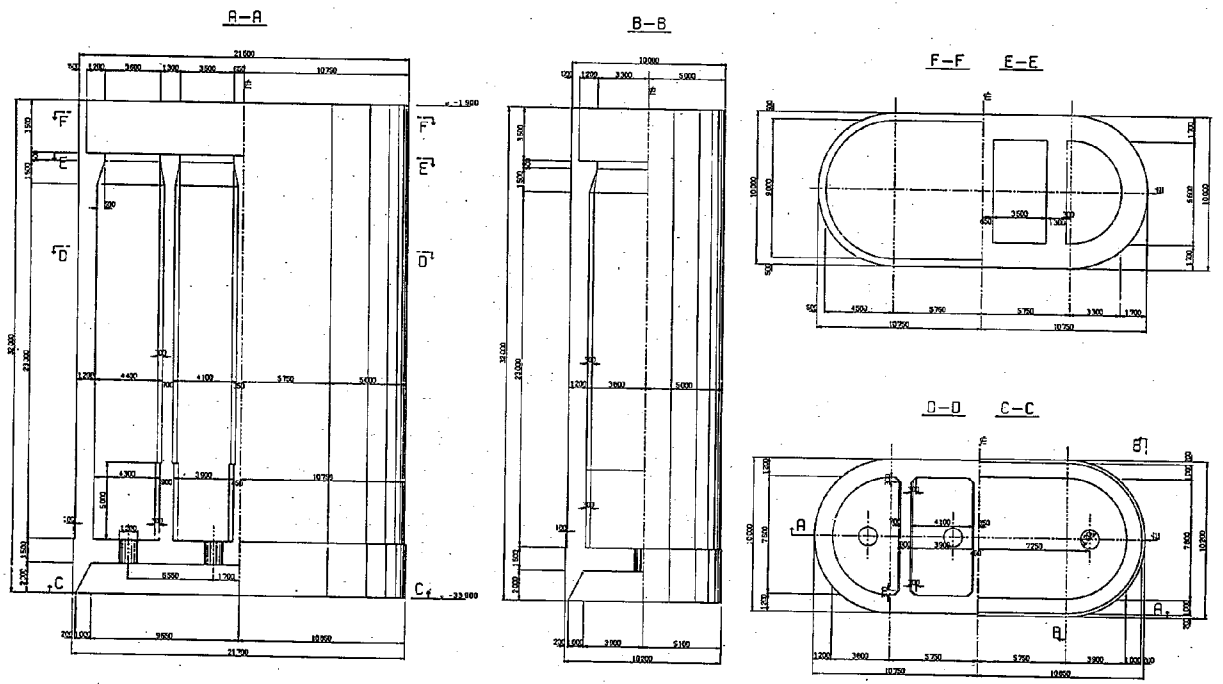
図－65　設計結果の比較（比較設計例 その4）



図－66　設計結果の比較（比較設計例　その5）



図－67　設計結果の比較（比較設計例　その6）



図−68　自動設計による図化例（一般寸法図）

設計条件

設計荷重

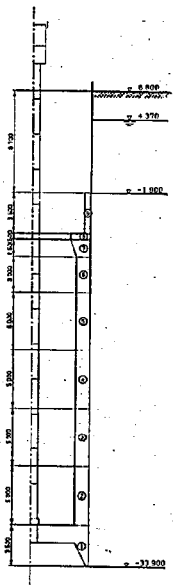
	常時		地震時	
	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向
鉛直力 (t)	8340.1	8340.1	7492.2	7492.2
水平力 (t)	0.0	0.0	3276.9	1798.1
傾倒モーメント (t-m)	0.0	0.0	51319.3	28642.8

レベル (m)

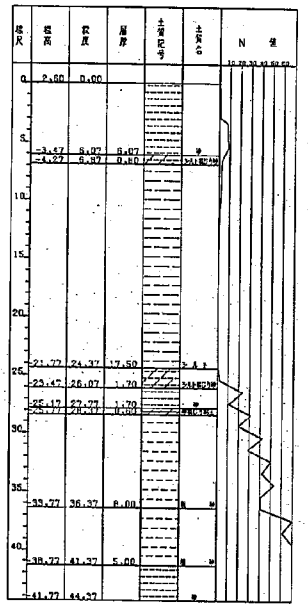
常時設計地盤面	2.600	フーチング天端面	-1.900
地震時設計地盤面	-3.400	フーチング下端面	-34.900
刃口据付面	6.800		
地下水位 [平水位]	4.370	施工時水位	4.370

土質条件

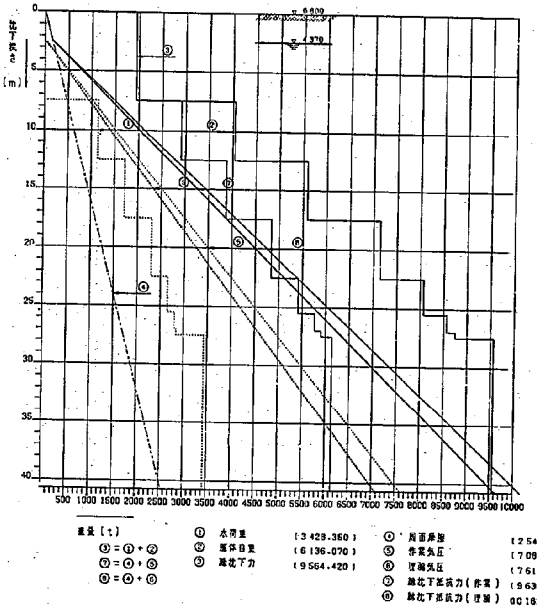
	単位体積重量 [t/m³]	粘着力 [t/m²]	内部摩擦角 [°]	N値
第1層	0.9	2.0	0.0	3.0
第2層	0.9	0.0	27.0	10.0
第3層	0.9	0.0	42.0	50.0
仮土	0.9	0.0	42.0	50.0



土質柱状図



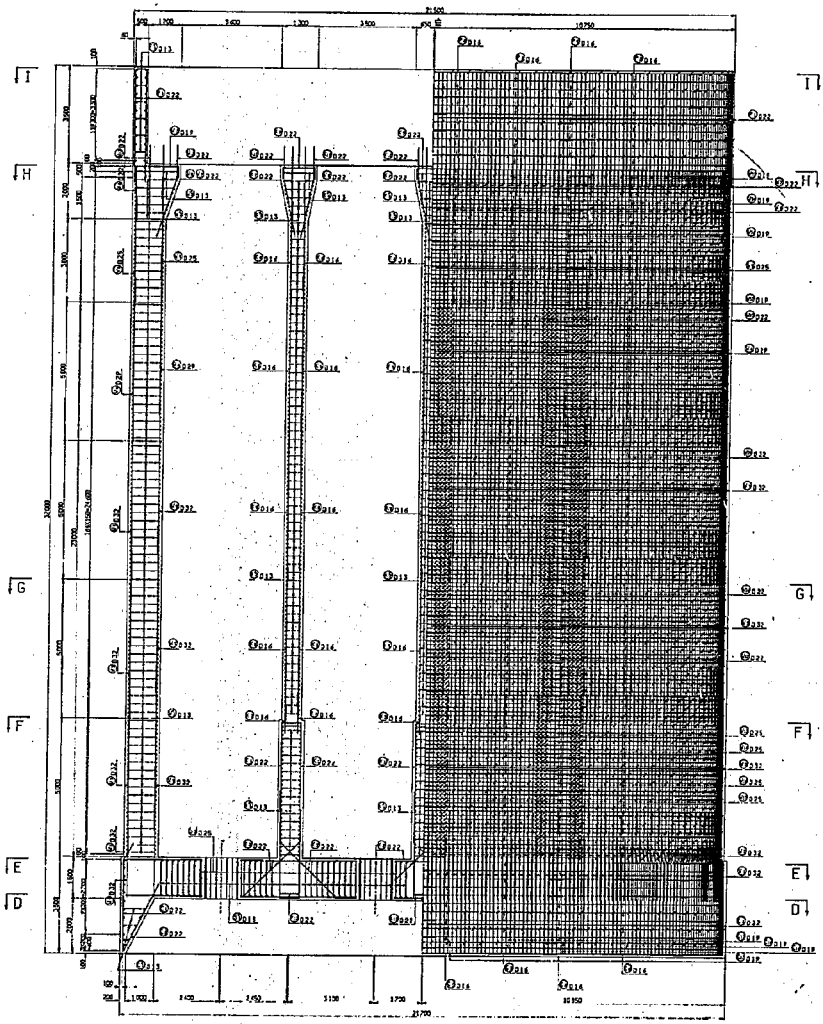
沈下関係図



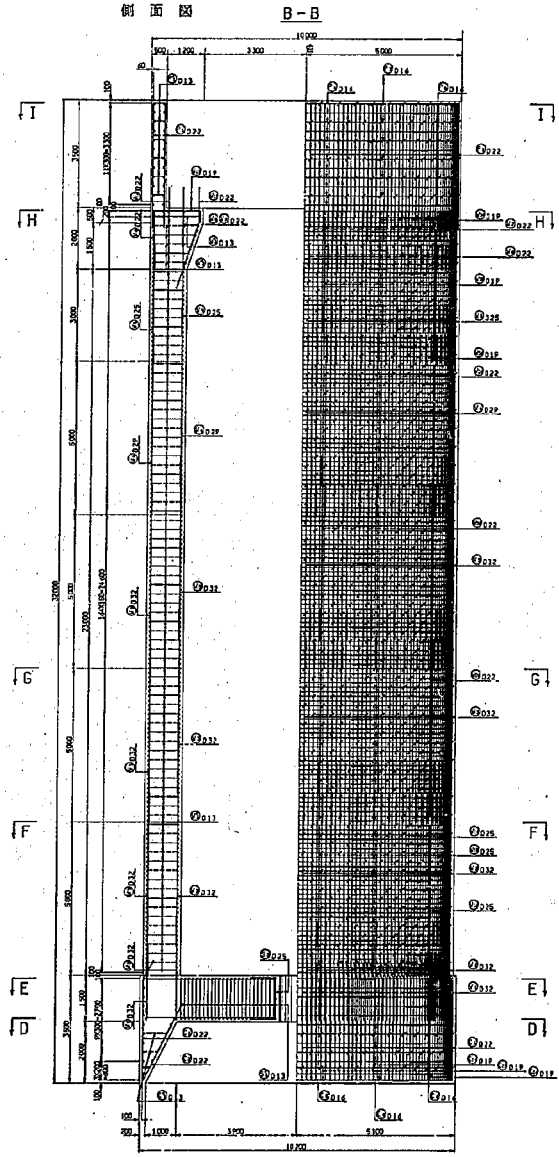
図－69 自動設計プログラムによる図化例（沈下関係図）

正　面　図

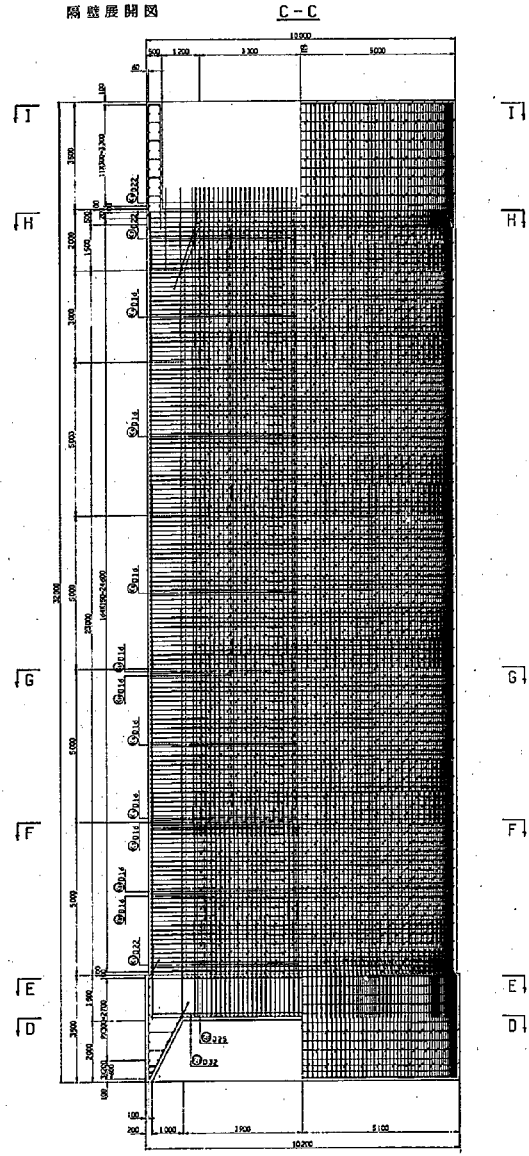
A－A



図－70　自動設計プログラムによる図化例（正面配筋図）

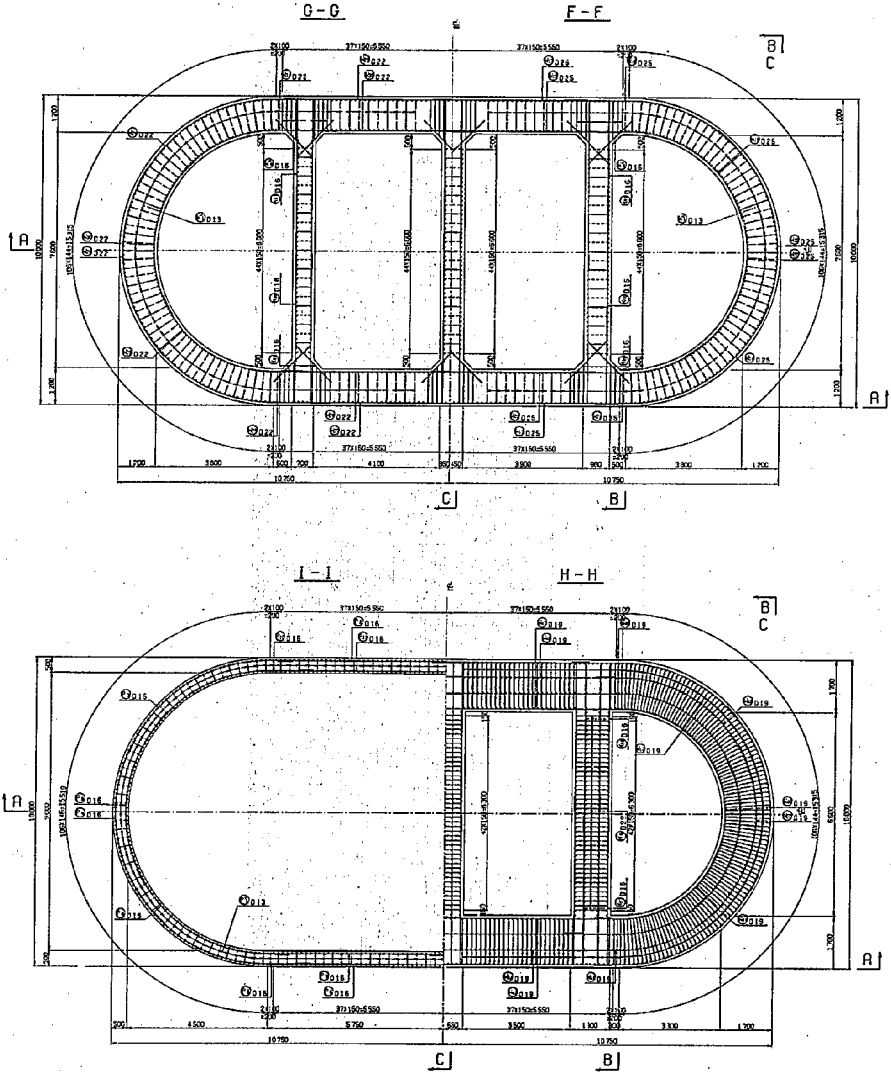


図－71－1　自動設計プログラムによる図化例（側面図，隔壁展開図）



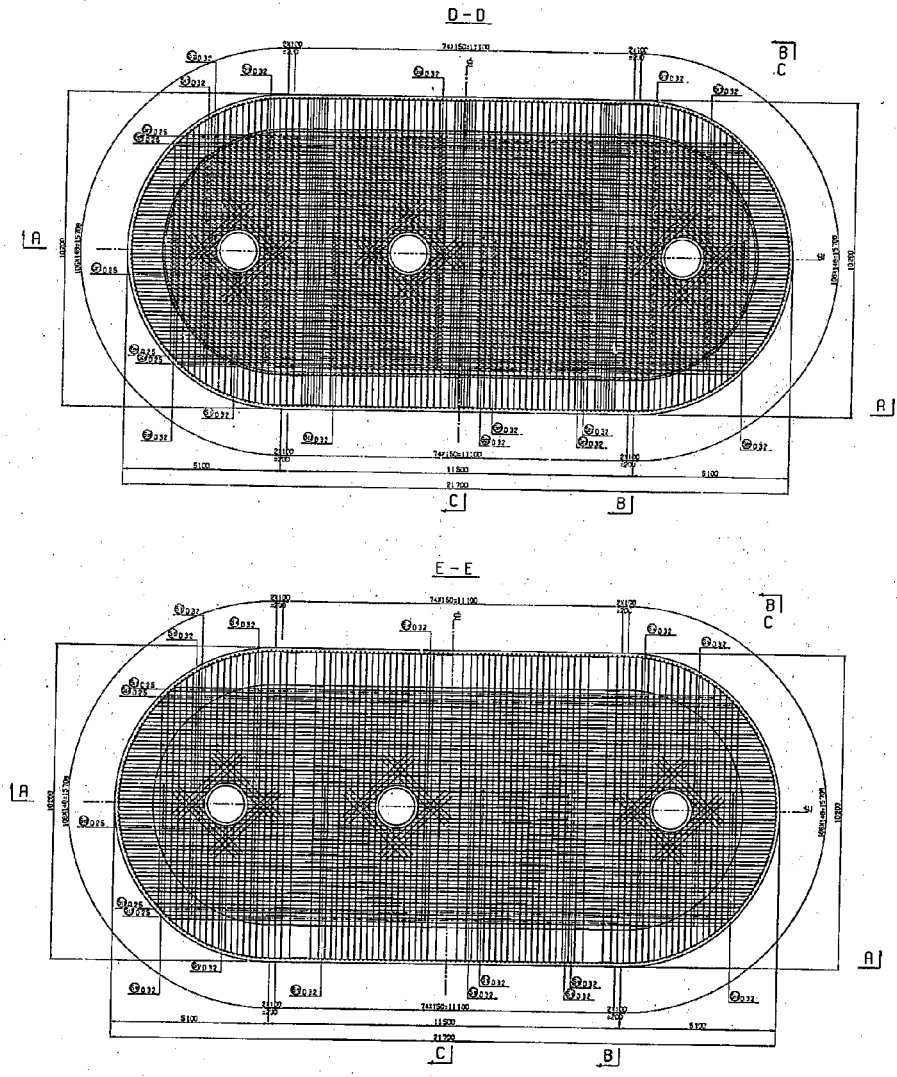
図－71－2　自動設計プログラムによる図化例（側面図，隔壁展開図）

平 面 図



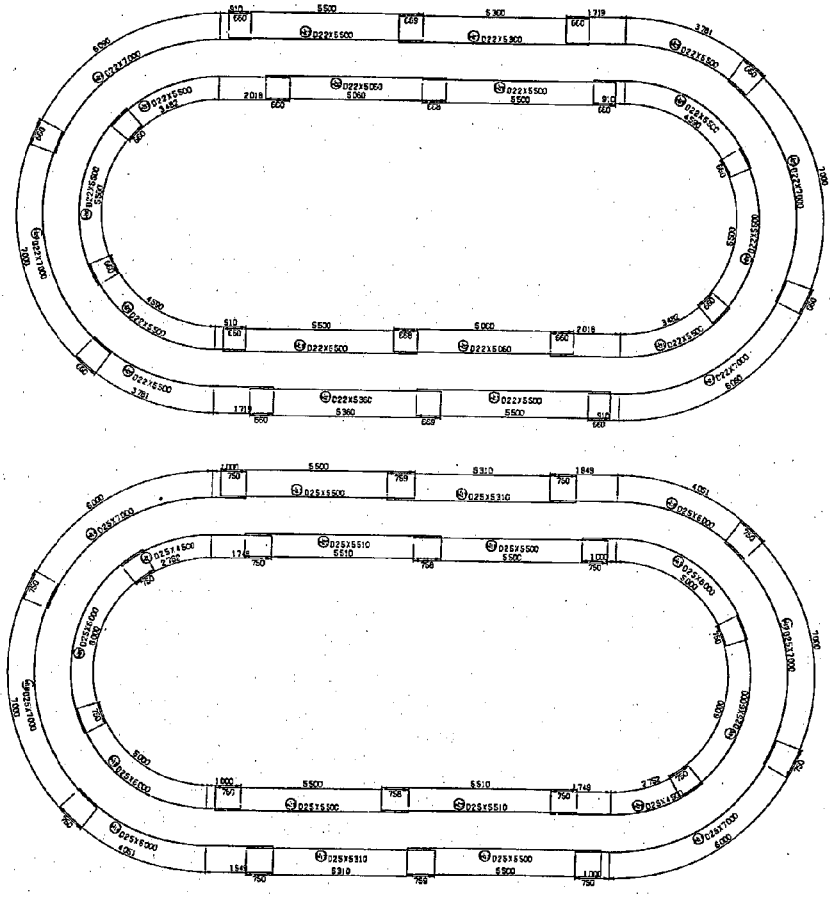
図－72　自動設計プログラムによる図化例（側壁頂版受部，胸壁平面配筋図）

平　面　図



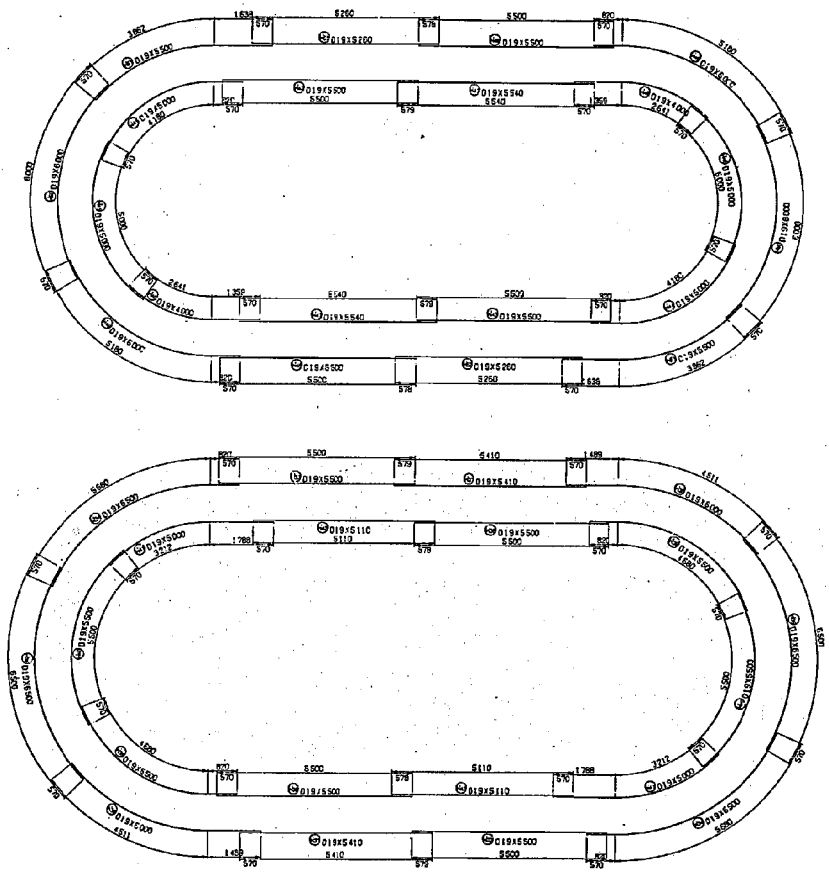
図－73　自動設計プログラムによる図化例（頂版配筋図）

鉄筋加工図



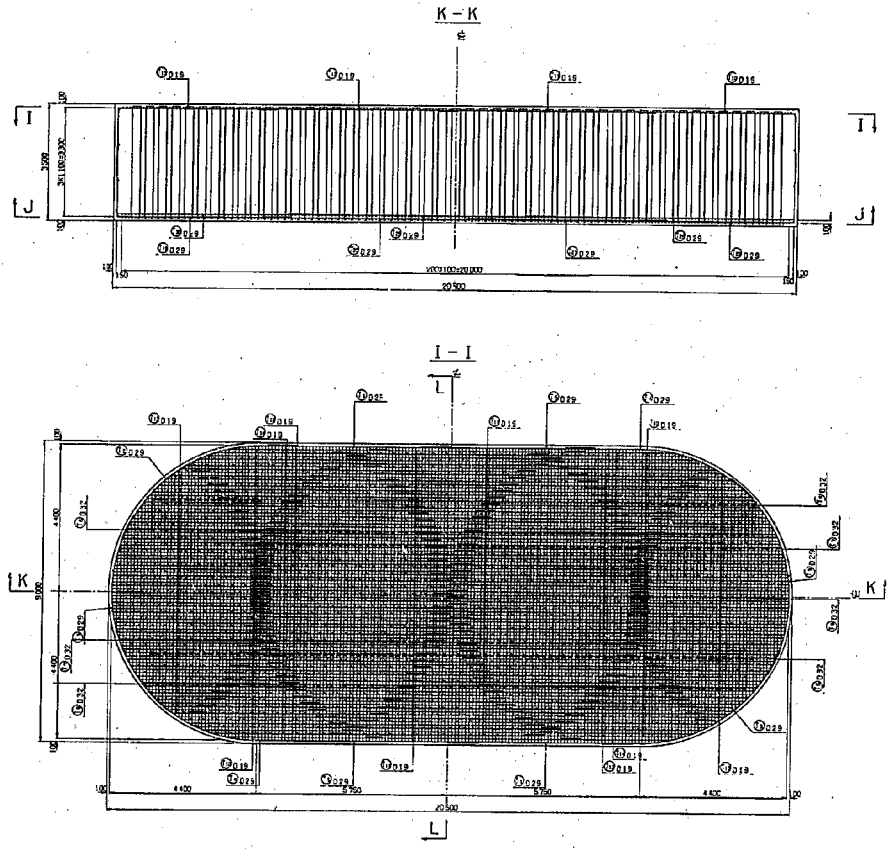
図－74－1　自動設計プログラムによる図化例（鉄筋加工図）

鉄　筋　加　工　図

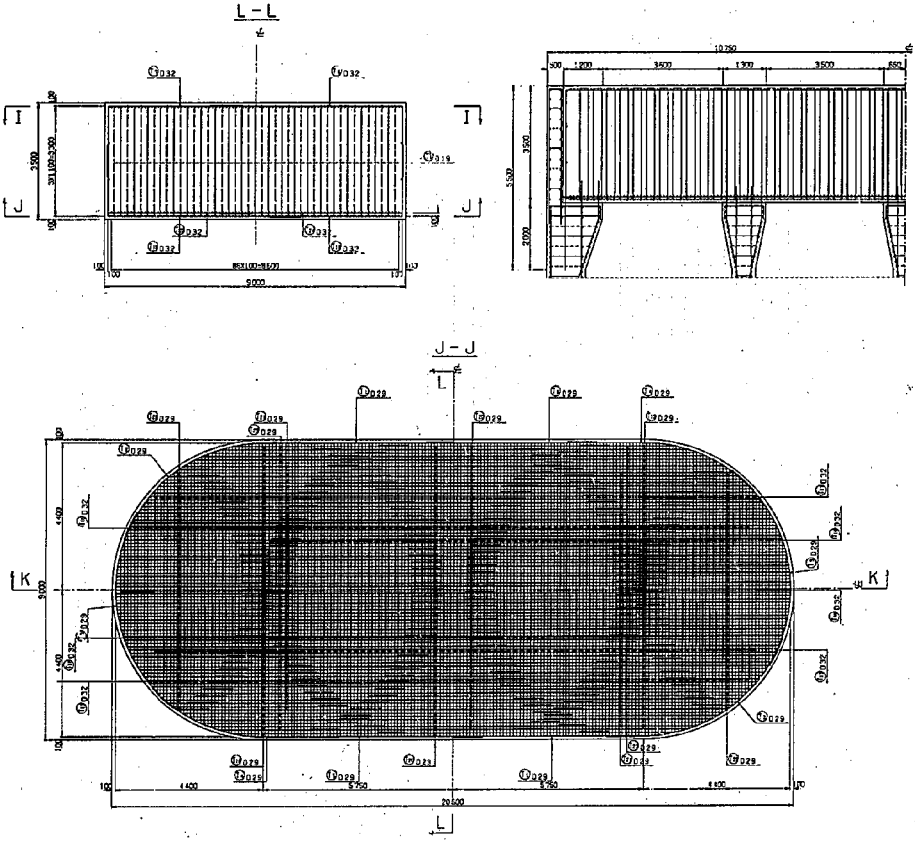


図－74－2　自動設計プログラムによる図化例（鉄筋加工図）

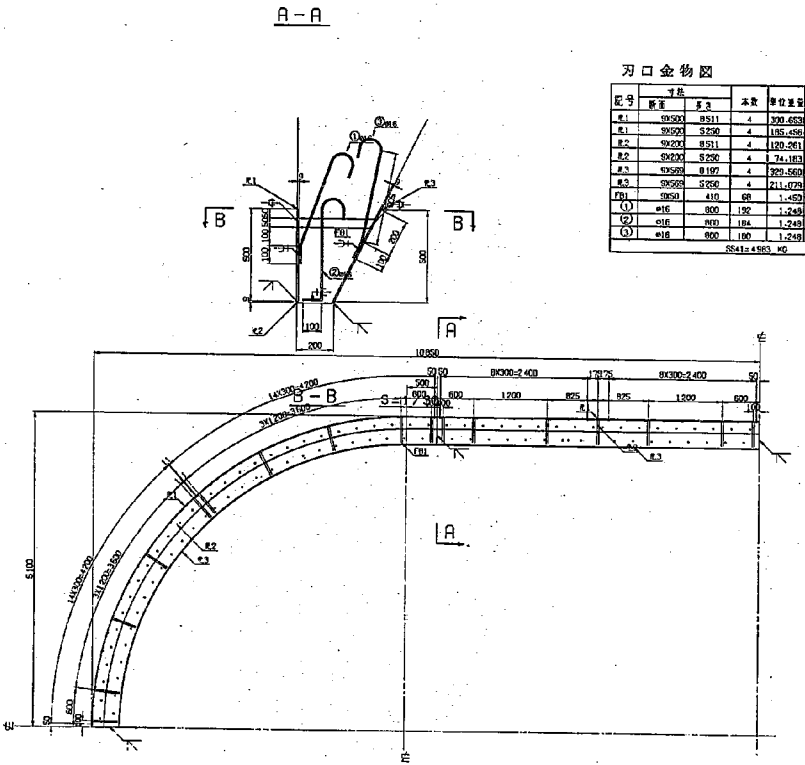
頂　版



図－75－1　自動設計プログラムによる図化例（頂版配筋図）



図－75－2　自動設計プログラムによる図化例（頂版配筋図）



刃口金物図

記号	寸法 断面	寸法 長さ	本数	単位重量	総重量	材質	備考
#1	9X50	8511	4	300.653	202.613	SS41	
#1	9X50	5250	4	185.456	741.825	SS41	
#2	9X200	8511	4	120.261	481.045	SS41	
#2	9X200	5250	4	74.183	296.730	SS41	
#3	9X550	8197	4	320.560	318.241	SS41	
#3	9X550	5250	4	211.079	844.315	SS41	
FB1	9X50	410	68	1.452	98.691	SS41	フラット・バー
①	φ16	800	192	1.249	239.616	SR30	
②	φ16	800	184	1.249	229.632	SR30	
③	φ16	800	180	1.249	224.640	SR30	
SS41＝4563 KG						SR30＝ 694 KG	

図－76　自動設計プログラムによる図化例（刃口金物図）

記号	径	長さ (mm)	本数	単位重量 (Kg/m)	1本当り重量 (Kg)	重量 (Kg)	摘要
C 1	D22	3 960	358	3.04	12.038	4 430.1	
C 2	D22	2 900	358	3.04	8.816	3 244.3	
C 3	D16	5 500	20	1.56	8.580	171.6	
C 4	D16	6 500	20	1.56	10.140	202.8	
C 5	D16	6 500	20	1.56	10.140	202.8	
C 6	D16	5 500	20	1.56	8.580	171.6	
C 7	D16	5 530	20	1.56	8.627	172.5	
C 8	D16	5 500	12	1.56	8.580	103.0	
C 9	D16	5 000	12	1.56	7.800	93.6	
C 10	D16	6 682	12	1.56	10.424	125.1	
C 11	D16	5 000	12	1.56	7.800	93.6	
C 12	D16	5 500	12	1.56	8.580	103.0	
C 13	D19	5 500	16	2.25	12.375	198.0	
C 14	D19	5 500	16	2.25	12.375	198.0	
C 15	D19	7 793	16	2.25	17.534	280.5	
C 16	D19	5 500	16	2.25	12.375	198.0	
C 17	D19	5 500	16	2.25	12.375	198.0	
C' 1	D13	712	276	0.995	0.708	195.5	
S 1	D32	5 400	9	6.23	33.642	302.8	
S 2	D32	3 000	72	6.23	18.690	1 345.7	
S 3	D25	2 900	106	3.98	11.144	1 181.3	
S 4	D32	8 000	100	6.23	49.840	4 984.0	
S 5	D32	6 059	50	6.23	37.748	1 887.4	
S 6	D32	2 902	11	6.23	18.079	198.9	
S 7	D32	4 432	11	6.23	27.611	303.7	
S 8	D32	5 000	11	6.23	31.150	342.7	
S 9	D32	3 792	11	6.23	23.624	259.9	
S 10	D32	2 902	11	6.23	18.079	198.9	
S 11	D25	6 000	52	3.98	23.880	1 241.8	
S 12	D25	4 700	36	3.98	18.706	673.4	
S 13	D25	3 975	16	3.98	15.820	253.1	
S 14	D25	7 338	8	3.98	29.205	233.6	
S 15	D25	4 248	40	3.98	16.907	676.3	
S 16	D32	8 000	100	6.23	49.840	4 984.0	
S 17	D32	6 059	50	6.23	37.748	1 887.4	
S 18	D32	2 902	11	6.23	18.079	198.9	
S 19	D32	4 432	11	6.23	27.611	303.7	
S 20	D32	5 000	11	6.23	31.150	342.7	
S 21	D32	3 792	11	6.23	23.624	259.9	
S 22	D32	2 902	11	6.23	18.079	198.9	
S 23	D25	6 000	52	3.98	23.880	1 241.8	
S 24	D25	4 700	36	3.98	18.706	673.4	
S 25	D25	3 975	16	3.98	15.820	253.1	
S 26	D25	7 338	8	3.98	29.205	233.6	
S 27	D25	4 248	40	3.98	16.907	676.3	
S' 1	D16	1 554	4352	1.56	2.424	10 550.3	
W 1	D32	2 416	347	6.23	15.014	5 210.0	
W 2	D32	3 370	347	6.23	20.995	7 285.3	
W 3	D32	5 960	2106	6.23	37.131	78 197.5	
W 4	D25	5 870	706	3.98	23.585	20 886.9	
W 5	D25	3 750	706	3.98	14.925	10 537.1	
W 6	D22	1 900	184	3.04	5.776	1 062.8	
W 7	D22	1 150	184	3.04	3.496	643.3	
W 8	D22	1 910	169	3.04	5.806	981.3	
W 9	D22	2 660	169	3.04	8.086	1 365.6	
W 10	D19	2 470	326	2.25	5.558	1 811.7	
W 11	D22	3 410	338	3.04	10.366	3 503.8	
W 12	D22	2 660	338	3.04	8.086	2 733.2	
W 13	D25	5 500	70	3.98	21.890	1 532.3	
W 14	D25	7 000	70	3.98	27.860	1 950.2	
W 15	D25	7 000	70	3.98	27.860	1 950.2	
W 16	D25	6 000	70	3.98	23.880	1 671.6	

記号	径	長さ (mm)	本数	単位重量 (Kg/m)	1本当り重量 (Kg)	重量 (Kg)	摘要
W 17	D25	5 310	70	3.98	21.134	1 479.4	
W 18	D25	5 500	70	3.98	21.890	1 532.3	
W 19	D25	6 000	70	3.98	23.880	1 671.6	
W 20	D25	6 000	70	3.98	23.880	1 671.6	
W 21	D25	4 500	70	3.98	17.910	1 253.7	
W 22	D25	5 510	70	3.98	21.930	1 535.1	
W 23	D22	5 500	200	3.04	16.720	3 344.0	
W 24	D22	7 000	200	3.04	21.280	4 256.0	
W 25	D22	7 000	200	3.04	21.280	4 256.0	
W 26	D22	5 500	200	3.04	16.720	3 344.0	
W 27	D22	5 360	200	3.04	16.294	3 258.9	
W 28	D22	5 500	200	3.04	16.720	3 344.0	
W 29	D22	5 500	200	3.04	16.720	3 344.0	
W 30	D22	5 500	200	3.04	16.720	3 344.0	
W 31	D22	5 500	200	3.04	16.720	3 344.0	
W 32	D22	5 060	200	3.04	15.382	3 076.5	
W 33	D19	5 500	66	2.25	12.375	816.8	
W 34	D19	6 500	66	2.25	14.625	965.3	
W 35	D19	6 500	66	2.25	14.625	965.3	
W 36	D19	6 000	66	2.25	13.500	891.0	
W 37	D19	5 410	66	2.25	12.173	803.4	
W 38	D19	5 500	54	2.25	12.375	668.3	
W 39	D19	5 500	54	2.25	12.375	668.3	
W 40	D19	5 500	54	2.25	12.375	668.3	
W 41	D19	5 000	54	2.25	11.250	607.5	
W 42	D19	5 110	54	2.25	11.498	620.9	
W 43	D19	5 500	6	2.25	12.375	74.3	
W 44	D19	5 000	6	2.25	11.250	67.5	
W 45	D19	5 000	6	2.25	11.250	67.5	
W 46	D19	4 000	6	2.25	9.000	54.0	
W 47	D19	5 540	6	2.25	12.465	74.8	
W 48	D19	5 500	14	2.25	12.375	173.3	
W 49	D19	6 000	14	2.25	13.500	189.0	
W 50	D19	6 000	14	2.25	13.500	189.0	
W 51	D19	5 500	14	2.25	12.375	173.3	
W 52	D19	5 260	14	2.25	11.835	165.7	
W 53	D19	5 500	20	2.25	12.375	247.5	
W 54	D19	4 000	20	2.25	9.000	180.0	
W 55	D19	6 843	20	2.25	15.397	307.9	
W 56	D19	4 000	20	2.25	9.000	180.0	
W 57	D19	5 500	20	2.25	12.375	247.5	
W' 1	D13	1 271	5930	0.995	1.265	7 499.3	
W' 2	D13	1 532	386	0.995	1.524	588.4	
W' 3	D13	1 765	78	0.995	1.755	137.0	
W' 4	D16	1 407	5989	1.56	2.195	13 143.2	
K 1	D22	7 660	282	3.04	23.286	6 565.8	
K 2	D22	3 490	282	3.04	10.610	2 991.9	
K 3	D16	950	141	1.56	1.498	211.2	
K 4	D16	1 440	141	1.56	2.246	316.7	
K 5	D16	5 480	845	1.56	8.549	7 232.3	
K 6	D16	3 560	282	1.56	5.710	1 610.1	
K 7	D22	2 660	141	3.04	8.086	1 140.2	
K 8	D22	2 180	141	3.04	6.627	934.4	
K 9	D22	1 900	129	3.04	5.776	745.1	
K 10	D22	3 350	270	3.04	10.184	2 749.7	
K 11	D32	6 000	48	6.23	37.380	1 794.2	
K 12	D32	4 910	48	6.23	30.589	1 468.3	
K 13	D22	1 360	18	3.04	4.134	74.4	
K 14	D25	6 000	48	3.98	23.880	1 146.2	
K 15	D25	4 570	48	3.98	18.189	873.1	
K 16	D16	5 500	1038	1.56	8.580	8 905.0	
K 17	D16	4 800	1038	1.56	7.488	7 772.5	
K 18	D16	1 980	204	1.56	3.089	630.1	
K 19	D16	1 720	720	1.56	2.683	1 931.9	

図－77－1　自動設計プログラムによる図化例（材　料　表）

記号	径	長さ (mm)	本数	単位重量 (Kg/m)	1本当り重量 (Kg)	重量 (Kg)	摘要
K 1	D13	930	552	0.995	0.925	510.8	
K 2	D13	762	2070	0.995	0.758	1569.5	
K 3	D13	1098	174	0.995	1.093	190.1	
K 4	D13	1562	33	0.995	1.554	51.3	
P 1	D22	4060	736	3.04	12.342	9084.0	
P 2	D16	5500	24	1.56	8.580	205.9	
P 3	D16	6500	24	1.56	10.140	243.4	
P 4	D16	6500	24	1.56	10.140	243.4	
P 5	D16	5500	24	1.56	8.580	205.9	
P 6	D16	5350	24	1.56	8.346	200.3	
P 7	D16	5500	28	1.56	8.580	240.2	
P 8	D16	6000	28	1.56	9.360	262.1	
P 9	D16	6000	28	1.56	9.360	262.1	
P 10	D16	5500	28	1.56	8.580	240.2	
P 11	D16	5310	28	1.56	8.284	231.9	
P' 1	D13	604	552	0.995	0.601	331.7	
T 1	D29	5500	8	5.04	27.720	221.8	
T 2	D29	6500	8	5.04	32.760	262.1	
T 3	D29	6500	8	5.04	32.760	262.1	
T 4	D29	6000	8	5.04	30.240	241.9	
T 5	D29	5180	8	5.04	26.107	208.9	
T 6	D32	8000	181	6.23	49.840	9021.0	
T 7	D32	6220	115	6.23	38.751	4456.3	
T 8	D32	5306	66	6.23	33.056	2181.7	
T 9	D32	8726	20	6.23	54.363	1087.3	
T 10	D19	6500	87	2.25	14.625	1272.4	
T 11	D19	6500	87	2.25	14.625	1272.4	
T 12	D19	6000	75	2.25	13.500	1012.5	
T 13	D19	5309	75	2.25	11.945	895.9	
T 14	D19	7049	12	2.25	15.850	190.3	
T 15	D32	8000	181	6.23	49.840	9021.0	
T 16	D32	6220	115	6.23	38.751	4456.3	
T 17	D32	5306	66	6.23	33.056	2181.7	
T 18	D32	8726	20	6.23	54.363	1087.3	
T 19	D29	7000	87	5.04	35.280	3069.4	
T 20	D29	7000	87	5.04	35.280	3069.4	
T 21	D29	6000	73	5.04	30.240	2207.5	
T 22	D29	5301	73	5.04	26.717	1950.3	
T 23	D29	7157	14	5.04	36.071	505.0	
T 24	D32	5500	161	6.23	34.265	5516.7	
T 25	D32	4310	115	6.23	26.851	3087.9	
T 26	D32	3894	45	6.23	24.260	1115.9	
T 27	D32	5594	40	6.23	34.851	1394.0	
T 28	D29	8000	87	5.04	40.320	3507.8	
T 29	D29	8000	67	5.04	40.320	2701.4	
T 30	D29	5119	67	5.04	25.800	1728.6	
T 31	D29	9325	20	5.04	46.998	940.0	
T' 1	D19	7419	1976	2.25	16.693	32984.9	

	径	重量 (Kg)
刃口	D22	7674.4
	D19	1072.5
	D16	1439.5
	D13	195.5
	計	10382.0
作業窓	D32	17999.2
	D25	7337.7
	D16	10550.3
	計	35887.2
側壁	D32	90692.7
	D29	20886.9
	D25	26785.0
	D22	46202.3
	D19	11877.7
	D16	13143.2
	D13	8224.7
	計	215812.5
隔壁	D32	3262.5
	D25	2019.3
	D22	16202.5
	D16	26510.9
	D13	2321.6
	計	51316.8
止水壁	D22	9084.0
	D16	2335.4
	D13	331.7
	計	11751.2
頂版	D32	44607.2
	D29	20876.1
	D19	37628.3
	計	103111.7
	D32	156551.7
	D29	41783.0
	D25	36142.0
	D22	77163.3
	D19	50578.5
	D16	56079.4
	D13	11073.6
	合計	429361.4

図－77－2　自動設計プログラムによる図化例（材　料　表）

土木研究所報告
第149号　1977年9月

テンターゲートの脚柱の立体的挙動に関する研究

柴田　功 *
斉藤　孝三 **

Study on Three Dimensional Behavior of Arms of Tainter-gates

by Isao Shibata
Kozo Saito

Synopsis:

On this report, the authors analyze three dimensional behavoir of the tainter-gates which were destructed or buckled, make clear the effect of strengthening members among arms numerically as framework system or statically determinate truss system, and discuss improvement of the existing design criteria of gates.

Key words. (tainter-gate, three dimensional analysis, arm, strengthening member statically determinate truss)

要　旨

本報文は，テンターゲートの破壊や変状を来たした例について立体挙動解析を行い，脚柱中間支持材の補剛効果をラーメン系と静定トラス系について数値的に明らかにし，現行設計法の改良点について論及したものである。

キイワード（テンターゲート，3次元解析，脚柱，中間支持材，静定トラス系）

目　次

1. まえがき……(2)
2. 立体的挙動研究の必要性……(2)
3. 解析の方法……(4)
4. 解　析……(6)
〔1〕Aゲート……(6)
(1) Aゲートの構造……(6)
(2) 脚柱のたわみ……(6)
(3) 脚柱の断面力と応力……(7)
(4) 中間支持材の断面力と応力……(13)
(5) 水平主桁間の縦トラスの断面力と応力…(14)
〔2〕Bゲート……(15)
(1) Bゲートの骨組構造……(15)
(2) 脚柱のたわみ……(17)
(3) 脚柱および中間支持材の断面力と応力…(17)
(4) 水平主桁間の縦トラスの断面力と応力…(17)
〔3〕Cゲート……(18)
(1) Cゲートの構造……(18)
(2) 脚柱および中間支持材の断面力と応力…(18)
〔4〕Dゲート……(20)
(1) Dゲートの骨組構造……(20)
(2) 脚柱のたわみ……(20)
(3) 脚柱および中間支持材の断面力と応力…(20)
(4) 水平主桁間の縦トラスの断面力と応力…(20)
5. 脚柱の立体的挙動と現行設計法の関係についての考察……(24)
〔1〕脚柱の構造……(24)
〔2〕中間支持材の断面……(24)
〔3〕たわみ……(24)
〔4〕溶接の残留応力……(24)
〔5〕水平主桁間の縦トラス……(24)

* 中部地方建設局長島ダム工事事務所長　前ダム部ダム構造研究室長
** ダム部ダム構造研究室　研究員

〔6〕設計計算方法……(25)
〔7〕主桁配置……(25)
6. 結　論……(25)
7. あとがき……(25)

1　まえがき

ダムの洪水吐に欠かせない構造物としてゲートがある。そのうち，テンターゲートは戸溝が不要で，かつゲート下端（リップ）をナイフエッジにできるので，水理設計上優れた形式のものである。また高いゲートでは，他の形式のローラーゲート等に較べると必要な鋼重も軽くなって，経済的になるのが普通である。

このようにテンターゲートは優れたものであるが，よく知られている和知ダムの事故以来，この形式には不信感があってその採用をためらう傾向がある。そして，あまり知られていないが，和知ダム以外にも脚柱の破壊や変状を来たしたゲートがいくつかあり，いずれも脚柱の中間支持材がラーメン構造のものである。このようなことから事故や変状の直接原因の追求とは別に，中間支持材の構造を主とし，現行の設計方法に不備な点がないかどうかを調査し，もしあるならば，早急に改善して，テンターゲートの事故のひき金となる間接原因を取除く必要がある。

この研究では，クレストテンターゲートの立体的挙動について解析するとともに，その結果を検討したところ現行の設計法には，いくつかの改良すべき点が見出されるのでそれらを報告することにしたい。

2　立体的挙動研究の必要性

〔1〕　和知ダムゲート事故技術調査委員会による事故原因調査報告の要約[1)]

和知ダムゲートの破壊の主要原因は，ゲートの脚柱全体としての強さが水圧に対して充分ではなく，水圧力をうけて全体が安定な平衡を保ち得なくなり，座屈を生じ破壊に到ったところにあると考えられる。

本ゲートのような構造系が水圧を外力としてうけた場合，その耐荷力の最も基本的な評価は，系としての座屈荷重を求め，外力と比較することである。

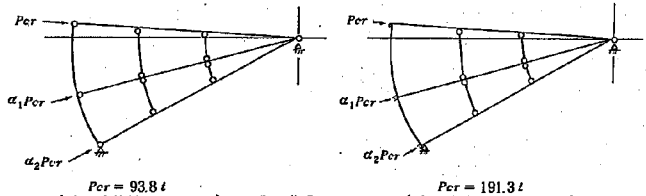
いま脚柱の端条件を門扉との接合部をヒンジ結合とし，またこれらの脚柱を結ぶ中間支持材と脚柱との継手を構造上ヒンジと考えた系に対して，水圧が作用する場合の座屈荷重を求めたものを示した図1によると座屈荷重は，作用荷重よりいずれも小さく，作用荷重に耐えることはできない。

かりに，脚柱間の中間支持材を取り去った構造系について，座屈荷重を求めても，支持材のある場合とほとんど変らない。すなわち，これらの支持材は，水圧がゲート全面に作用し，系全体として座屈する場合にはほとんどその補剛の効果を現わさないものとみなければならない。

中間支持材が補剛効果をもたないものとして，本ゲート脚柱の細長比を脚柱の全長を部材長として求めれば，上段脚柱 208，中段脚柱 174，下段脚柱 163 となる。部材の細長比があまり大きいと，たとえ計算上余裕があっても，構造物全体としての剛性に欠けることになる。水門鉄管技術基準[2)]によれば，主要圧縮部材については ℓ/r は120 以下と決められている。

脚柱と扉体との接合部を，かりに完全固定と考え，系の座屈荷重をまえと同様に計算すると図1のように作用荷重に対してかなり大きい値となるが，接合部を完全固定とし，初期たわみのない真直ぐな部材で，荷重の偏心，残留応力の全くない理想的状態に対するもので，実際の耐荷力はこれらの値をかなり下まわるものとみなければならない。また，この系でも，前の場合と同様に，中間支持材はほとんど補剛の役目をはたしていない。

圧縮材では，初期たわみが耐荷力に与える影響は一般に小さく無視されるのが普通であるが，本ゲートの脚柱は，圧縮材としての細長比が大きく，初期たわみもまたかなりの影響をもつものと考えねばならない。



$P_{cr}=93.8\,t$
（中間支持材なし 90.4 t）　作用荷重 118.3 t　$P_{cr}=191.3\,t$
（中間支持材なし 184.5 t）

図－1　脚柱先端の条件と座屈荷重

脚柱断面に生ずる応力についてみれば，初期たわみのない場合には，軸力のみによって 750 ～ 800 kg/cm² であったものが，初期たわみ 20 mm とすると 1800～2000 kg/cm² とかなり大きい値となる。残留応力の影響などを考慮に入れれば，この程度の応力で部材が降伏することも充分考えられよう。

一般に構造物の一部が，座屈，降伏などによる破損を生じても，構造物は，その系としての耐荷形式を変え，外力に抵抗し，決定的な破壊にはいたらない場合が多いのであるが，本ゲートでは，その構造形式から脚柱の座屈が部分的破損にとどまらず，直ちに全体の破壊を誘起する。このことが事故の被害を大きくした一つの原因である。

以上のように，本ゲートの脚柱は，その系としての座屈荷重が小さいこと，支柱が脚柱の耐荷力の向上にほとんど無効であること，圧縮材としての細長比がかなり大きいこと，初期のたわみの影響によって水圧による部材応力が大きくなっていることなどからして，水圧に対する耐荷力にかけていたことが破壊の主原因であったといえる。

とくに本ゲートの設計上配慮の欠けていた点で破壊に直接結びつくものとしては，脚柱と中間支持材の結合が弱かったこと，あるいは斜材を入れなかったことが指摘できる。このうちのいずれかの配慮だけでもなされていれば，今回の事故は生じなかったであろう。

すなわち

a）中間支持材は脚柱に対して単純にピン結合の設計となっている。ピン結合の場合と，剛結合の場合の座屈荷重を比較すると図2のように，A．B，C端がピン結合であったとしても中間支持材が剛結されていればきわめて丈夫であり，座屈荷重に対応する作用荷重は約 120 トン以下なので，今回の事故は起こり得ない。

b）たとえ脚柱と主けたとの取り付け部および中間支持材と脚柱の取り付け部が，ともにピン結合であったとしても，もし斜材が入っていれば座屈荷重は図2に示したように増加し，系として安定となる。

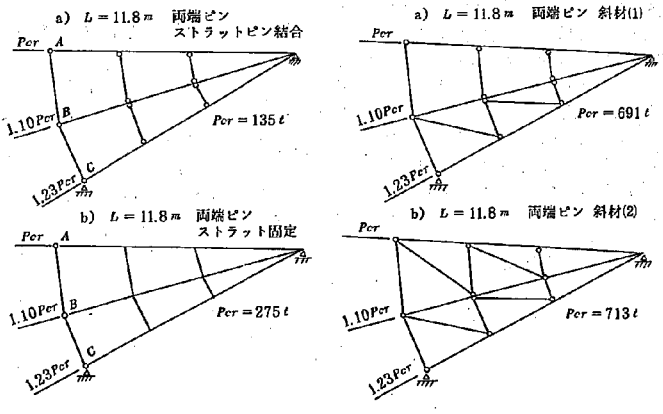
慣用の設計計算法による限りはこのような中間支持材の剛結効果あるいは斜材の効果を数値的に明らかにすることはできなかったであろうが，少なくとも設計時にこれらの両効果に対する経験的配慮が望ましかった。

なお，座屈を生じた諸要因としては，さらに小開度放流による振動と流水遮断時の動水圧，据付後の左右不均衡，トラニオンピンの摩擦などがあり．これらが上述の主原因と相重なってゲートを破壊にいたらしめたものと考えられる。

〔2〕 テンターゲートの脚柱の立体挙動の研究の必要性

前述のように，和知ダムの事故は，脚柱中間支持材の設計の不徹底により，脚柱全体としての剛性が不足したためと考えられている。しかし，その設計は，現行の設計基準に照らすかぎり特に指摘する点がなかったことも認められている。

さて，和知ダムゲート事故原因調査報告では，3段の脚柱を結ぶ鉛直な系をとりだして，2次元的な座屈荷重の解析を行ない，前項の図2に示したように，中間支持材をトラス組にした場合はもちろん，ラーメン



図－2　ストラットの結合方法と座屈荷重

構造を企図して支持材ならびにその脚柱との接合部の構造を充分剛にしただけでも事故を防止し得たものと推論している。

しかし，水平な主桁と脚柱はπ形のラーメン構造であって，上述の鉛直な系に，面外の水平な端力と端モーメントが作用する。さらに，前項の図1と図2では脚柱の先端の条件によって座屈荷重に差がでているが実物のゲートでは，主桁の回転にともなう端モーメントと端力が作用し，それを固定するために設ける縦トラスの作用もあって，脚柱の応力状態は単純なものではない。

そして，本研究でとりあげたテンターゲートの例では，事故を起したり，あるいは何らかの処置をしなければならなかったものであるが，いずれも脚柱中間支持材の構造はラーメン系である。したがって，前述の報告で安全であると推論したラーメン構造には上述のような条件が重なって，なお検討すべき問題があることを示唆しているものと考えられる。

このようなことから，設計基準に不備な点がないかどうかを調査することを目的とした本研究では，平面的に分割した解析では不充分であり，テンターゲート全体としての立体的な挙動を把握して3次元解析による応力を求め，慣行の2次元設計法に問題がないかをチェックしなければならない。

3　解析の方法

構造物を3次元的に解析することはむずかしい問題で種々の研究があるが，すべてのものに通用する解析法はいまだ開発されていない。特に一般の実例でみられるテンターゲートでは，スキンプレート付近の鋼床板を支える格子構造と，脚部の骨組構造の組合せの複雑な不静定構造であり，その解析はきわめて困難である。ここではテンターゲートを，微小変位論の適用範囲にあるものとして後でのべる仮定に従がい，立体剛結トラスにおきかえて応力解析することにした。解析の結果によると静定系とした骨組構造では変位も小さく，充分な精度を有するものと考えられる。

解析法は骨組構造を材料の弾性域で解析するもので，部材力と変位の関係を示すスティフネス・マトリクスを解いて，部材軸に関する端力および端モーメントを求める。

部材 ij を考えたとき，i 点における断面力は次式で示される。

$$F_x^i = \frac{E\cdot A}{\ell ij}(d_x^i - d_x^j) - F_{ox}^i$$

$$F_y^i = \frac{1}{\left(\frac{\ell^2 ij}{12EIz} + \frac{\ell ij}{GA}\right)}(d_y^i - d_y^j) - \left(\frac{1}{\frac{\ell^2 ij}{6EIz} + \frac{2}{GA}}\right)(\theta_z^i + \theta_z^j) - F_{oy}^i$$

$$F_z^i = \frac{1}{\left(\frac{\ell^3 ij}{12EIy} + \frac{\ell ij}{GA}\right)}(d_z^i - d_z^j) - \frac{1}{\left(\frac{\ell^2 ij}{6EIy} + \frac{2}{GA}\right)}(\theta_y^i + \theta_y^j) - F_{oz}^i$$

$$M_x^i = \frac{G\cdot Ix}{\ell ij}(\theta_x^i - \theta_x^j) - M_{ox}^i$$

$$M_y^i = -\frac{1}{\left(\frac{\ell^2 ij}{6EIy} + \frac{2}{GA}\right)}(d_z^i - d_z^j) + \frac{2EIy}{\ell ij(GA\ell^2 ij + 12EIy)}\{2(GA\ell^2 ij + 3EIy)\theta_y^i + (GA\ell^2 ij - 6EIy)\theta_y^j\} - M_{oy}^i$$

$$M_z^i = \frac{1}{\left(\frac{\ell^2 ij}{6EIz} + \frac{2}{GA}\right)}(d_z^i - d_z^j) + \frac{2EIz}{\ell ij(GA\ell^2 ij + 12EIz)}\{2(GA\ell^2 ij + 3EIz)\theta_z^i + (GA\ell^2 ij - 6EIy)\theta_z^j\} - M_{oz}^i$$

したがって，一般の節点方程式を

$$M'_{AB} = \frac{EI}{\ell}(2\alpha\theta_A + \beta\theta_B - \gamma\frac{r}{\ell}) + C_{AB}$$

とすれば

$$\alpha = \frac{GA\ell^2 + 3EI}{GA\ell^2 + 12EI}$$

$$\beta = \frac{GA\ell^2 - 6EI}{GA\ell^2 + 12EI}$$

$$\gamma = \frac{3GA\ell^2}{GA\ell^2 + 12EI}$$ として計算できる。

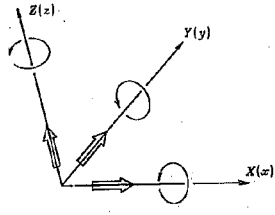
なお断面力を示す式中の記号は次のとおりである。

Fx，Fy，Fz：x，y，z 軸方向の力
Mx，My，Mz：x，y，z 軸のまわりモーメント
dx，dy，dz：x，y，z 軸の方向の変位
θx，θy，θz：x，y，z 軸方向の回転角
A　　：部材 ij の断面積

ℓ_{ij}　：部材ijの長さ
E　：弾性係数
G　：せん断弾性係数
I_x　：x軸に関する断面二次極モーメント
I_y, I_z　：y z軸に関する断面二次モーメント

なお，FおよびMにつけたサフィックス0は初期荷重（外力）を指す。

計算に用いる座標系は，絶対座標系と部材長軸に沿ってx軸をとる部材座標系を設け，算出される力およびモーメントの正の方向は図－3に示すとおりである。

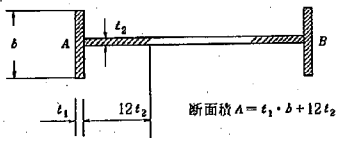


図－3　座標軸の方向と断面力の正方向

この座標系は"右手直交系"でそれぞれ親指はx軸，人指し指はy軸，中指はz軸の正の方向，モーメントは各軸の正の方向に右ネジを進ませたとき，その方向を正とした。

テンターゲートを骨組構造におきかえて応力解析するには，いくつかの問題がある。この報告で用いた主要な条件を次にのべる。

①主桁；主桁の桁高が大きい場合にはこれをトラスにおきかえる。その場合，骨組の関係でI形主桁の桁高とおきかえたトラス上下弦材の距離を揃えるため，桁の両端格点A，Bを設けその有効断面積は図－4のようにとる。



図－4　I形断面のトラスへの置き換え

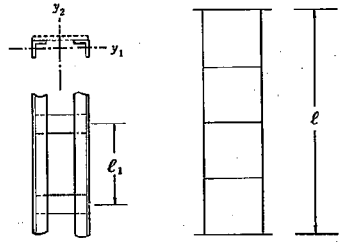
次にウエブプレートの面内せん断変形に対する剛性は斜材で補うことにする。長方形a×b，厚さtの板の等価斜材の断面積は次式で示される。

$$A=\frac{Gt}{Eab}(a^2+b^2)^{\frac{3}{2}}$$

このようにして計算した斜材は，両端ヒンジの円柱とし自重はI形主桁のそれと等しくなるよう比重を小さいものとする。

②スキンプレート；スキンプレートの面内せん断剛性は，主桁のウエブプレートと同様の等価斜材で補なう。

③上下脚柱間のトラスなどの連結材に2本の山形鋼を用い，数ケ所のタイプレートで結んだラチス柱は，DIN4114により次式で断面二次モーメントを算出する。（図5）



図－5　ラ チ ス 柱

$$\lambda_{ye}=\sqrt{\lambda_{y_2}^2+\lambda_{y_1}^2}\ \cdots\cdots\ (\text{DIN4114})$$

$$i_{y_2e}=\frac{i_{y_2}^2\cdot i_{y_1}^2}{i_{y_1}^2+i_{y_2}^2\frac{\ell_1^2}{\ell_2^2}}$$

$$I_{y_2e}=i_{y_2e}\cdot A$$

A＝断面積

④ジョイント；この報告では部材の両端のジョイントはヒンジおよび剛結としてそれぞれサフィックスP，Rで示すこととする。ただし前述の主桁ウエブおよびスキンプレートをおきかえた斜材はピン接合とする。

⑤変断面部材；部材の両端で断面が異なる場合の断面の諸性質は，両端の平均値とする。

⑥ゲートの支持；トラニオン部ではX軸のまわりの回転だけが自由で，他軸のまわりの回転および直交3軸方向の変位は許されない。

特定の場合を除き，ゲート前部は下部主桁上の巻上点で鉛直方向の支持をされる。側部はサイドローラーの位置でX軸方向の変位が拘束される。

⑦荷重；荷重の種類は静水圧荷重，自重，巻上荷重とする。静水圧荷重は原則として縦桁に作用するものとする。スキンプレート上に作用する荷重の縦桁への配分はスキンプレートを単純桁とみなす。自重は各部に下向きの等分布荷重として作用させる。ただし，スキ

ンプレートは縦桁に作用させる。巻上力は原則として絶対座標系の3方向の分力を作用点にかける。トラニオンピンのまわりの摩擦力は2次元計算で分配された上下脚柱のスラストに比例して作用するものとして取扱う。

⑧$E.G.$ $E=2100.000\,kg/cm^2$

$G=810.000\,kg/cm^2$ とする。

⑨Mxによるせん断応力の算出については参考文献[3]を準用し次式によった。

$$Z=\frac{3C_2\,Mx}{b_1C_1^3+2b_2Cy^3}$$

ここに，b_1：ウェブの高さ，b_2：フランジの幅

c_1：ウェブの厚さ，C_2：フランジの厚さ

また，Mx 計算に用いた Ix については部材を矩形片に分割し，

$$Ix=\Sigma\frac{bi\,ti^3}{3}$$ として求めた。[4]

ここに，bi：矩形片の巾，ti：矩形片の厚さ

4　解　　析

〔1〕　Aゲート

(1)　Aゲートの構造

昭和42年に破壊事故を起した和知ダムのクレストテンターゲートを基本として解析したものがAゲートである。事故の状況は写真1に示すようである。

このゲートは図6に示すようにスレンダーな脚柱をもつが，その細い断面を変えずに，脚柱間の中間支持材の構造が脚柱におよぼす影響を調査した。

次に解析したケースの概要をのべる。

①AO_P および AO_R

事故を起し，種々の調査がなされた構造そのままである。脚柱間の支持材は接合部が不完全なラーメン状の構造で $A=44.3cm^2$，$Iy=66.5cm^4$ の断面特性をもつ。この継手をヒンジとして解析したものが $A0_P$，剛結としたものが $A0_R$ である。（以下のケースでもヒンジはP，剛結はRのサフィックスをもって示す）

②$A1_R$

$A0_P$ および $A0_R$ の解析で中間支持材端部のMyが大きくそれに伴う脚柱の応力に及ぼす影響も大きいので，十分剛なラーメン構造とすべく，中間支持材を脚柱の断面と同じとし，$A=132.3cm^2$（$157.3cm^2$），$Iy=4617cm^4$（$7295cm^4$）としたものである。

③$A2_P$ および $A2_R$

A0およびA1ではラーメン構造で2次応力が大きい。そこで静定トラス系にすることとし，中間支持材はすべて90×90×7の等辺山形鋼（$A=12.2cm^2$，$Iy=93cm^4$）の細い部材にした。その細長比は垂直支柱で40～92，斜材で145～175であるが，実物の設計をするときには，斜材の細長比を150以下にすること（水門鉄管技術基準第20条）[2] および最小板厚を8mm以上にすること（水門鉄管技術基準第20条解説，中形以上の水門扉の項）によって決められる断面の部材に揃えることになろう。

なお，中間支持材を含む鉛直構造で，全体がピン結合であるとして部材数m，格点数j，静定反力数3のとき。

$$m+3=2j$$

の関係があれば静定系となる。したがって，ここでは下脚と中脚の間に斜材を入れれば静定系となるのでそのようにした。なお中脚と上脚の間にも斜材を設けた解析ではその斜材は冗材となり，応力値に及ぼす影響は小さい。（水門鉄管　№85）[5]

④$A3_P$ および $A3_R$

A0～A2では変状を来たしたゲートを基本として解析したため図1に示したように脚柱の平面形状がトラニオンピン820mmの位置で折れ曲がっている。そこでA2の脚柱を直線になるように変更した。

⑤$A4_P$ および $A4_R$

A2～A3では斜材をハウトラス状とし，圧縮力が働くようにしているので，A4の斜材を逆向きのプラットトラス状に変え引張力が働くようにした。

これらの解析したケースをまとめて示したものが表1である。

(2)　脚柱のたわみ

解析によって得られた脚柱のたわみは図7に示すとおりである。

この図によると，A_0 では下方に大きくたわむが，A_1 ではかなり改良されている。

写真1　Aゲート破壊事故（42.6.27）

静定トラス系としたA2～A4では，たわみは小さく，かつピン結合，剛結共大差はない。

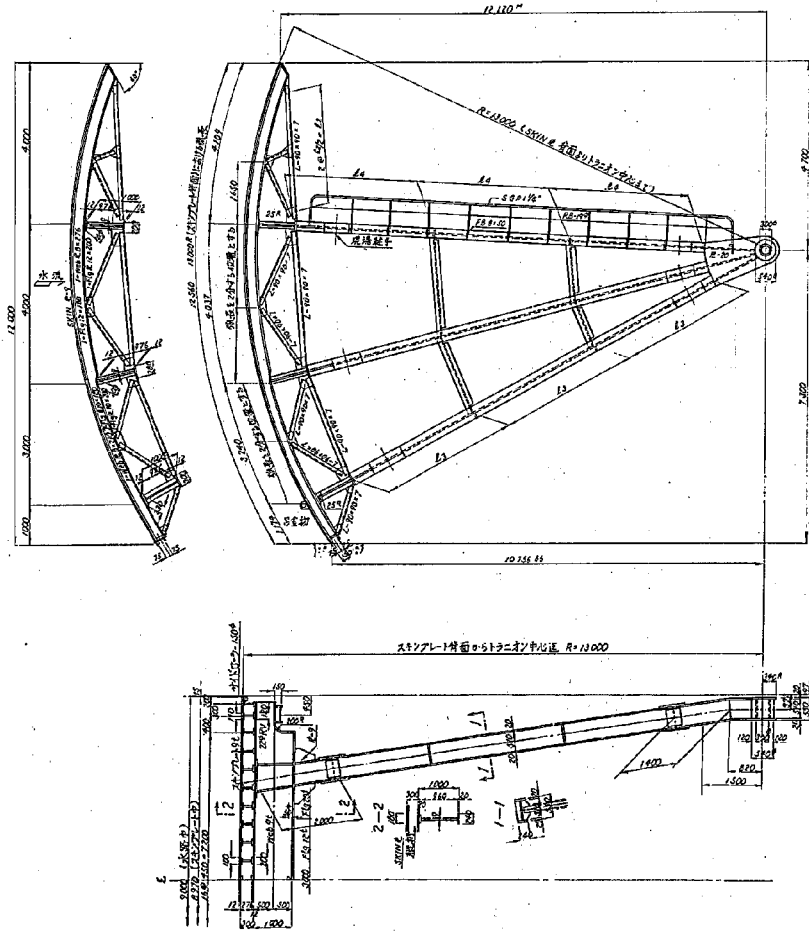
(3) 脚柱の断面力と応力

解析によって得られた脚柱についての断面力と応力を示せば附表1のようになる。なお，解析に用いた格点の番号は図8のとおりである。

脚柱について軸力 F_x による軸方向圧縮応力，曲げモーメント M_y および M_z による曲げ圧縮応力を単純に合計して，各部の最大圧縮応力として示せば表2のようになる。この表には設計に用いた2次元計算による応力と許容応力を付記しておいた。

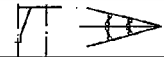
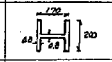
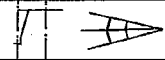
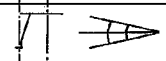
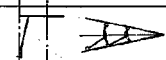
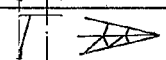
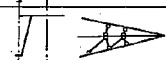
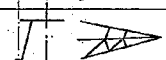
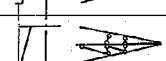
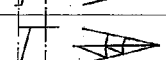
前述したように中間支持材端をヒンジとした構造をサフィックスP，剛結としたものをサフィックスRで示してあるが，それらの応力が上下限値となって実応力は，その中間にあると考えられる。

次にこれらの表について考察を加えてみよう。



図－6　Aゲート一般図

表1　Aゲートの解析構造一覧表

ケース	構造	脚柱略形状	中間支持材
$A0_P$	旧部材断面そのままのものを用い，脚柱中間支持材の取付部をヒンジとする。		
$A0_R$	$A0_P$と同様な部材断面で，脚柱中間支持材の取付部を剛結したもの。		同　上
$A1_R$	$A0_R$のラーメン構造で，中間支持材の断面2次モーメント（I_Y面内）を脚柱と等しくしたもの。端部は剛結とする。		脚柱I_Yと同じ断面部材
$A2_P$	脚柱中間支持材の全部材を等辺山形鋼に替え，中部脚柱と下部脚柱間に斜材を入れる。端部はヒンジとする。		等辺山形鋼 90 × 90 × 7
$A2_R$	$A2_P$の中間支持材端部を剛結としたもの。		同　上
$A3_P$	$A2_P$について，脚柱の水平面上の折曲りを除去したもの。		同　上
$A3_R$	$A2_R$について，脚柱の水平面上の折曲りを除去したもの。		同　上
$A4_P$	$A3_P$の中間支持材の斜材をプラットトラスとしたもので，端部はヒンジとする。		同　上
$A4_R$	$A3_R$の中間支持材の斜材をプラットトラスとしたもので，端部は剛結とする。		同　上

AOpゲート脚柱たわみ図

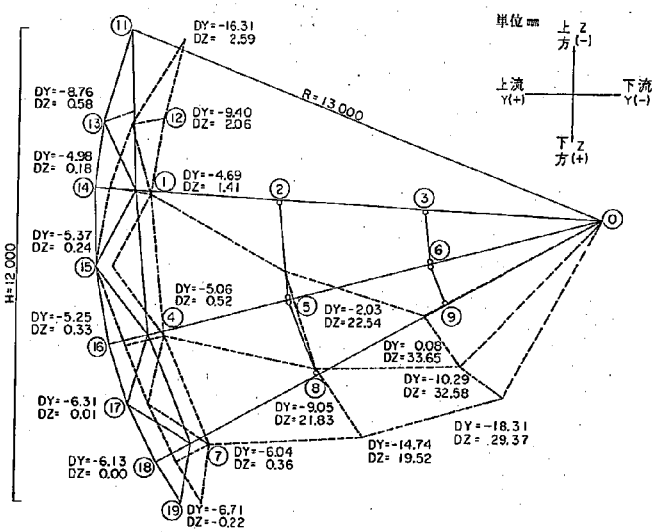


図7－1－1　Aゲート脚柱たわみ図

AORゲート脚柱たわみ図

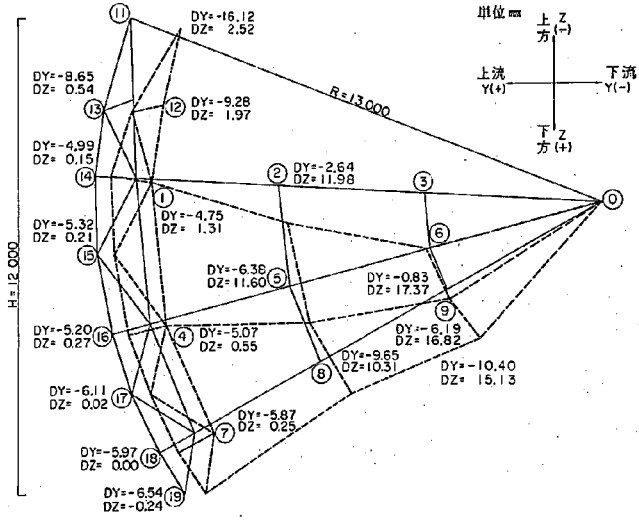


図7－1－2　Aゲート脚柱たわみ図

A1Rゲート脚柱たわみ図

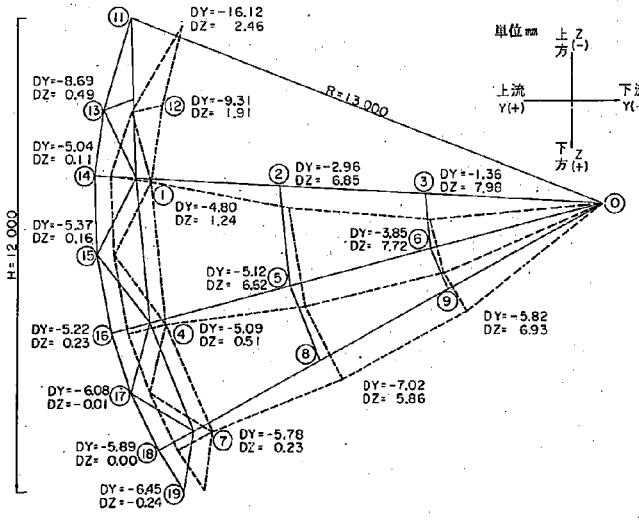
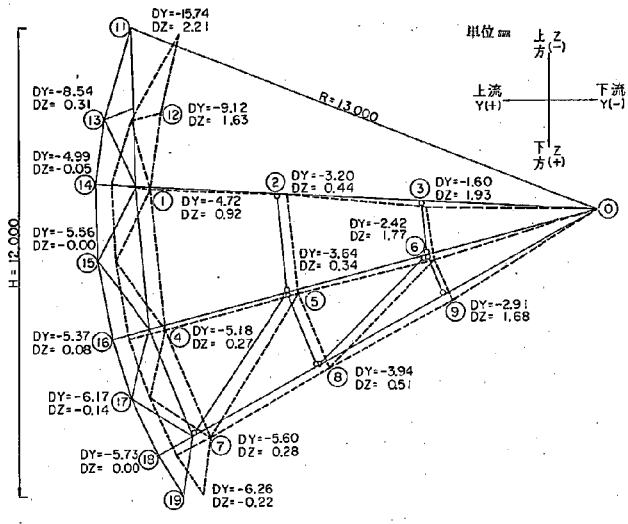


図7－2　Aゲート脚柱たわみ図

A2Rゲート脚柱たわみ図



A2Pゲート脚柱たわみ図

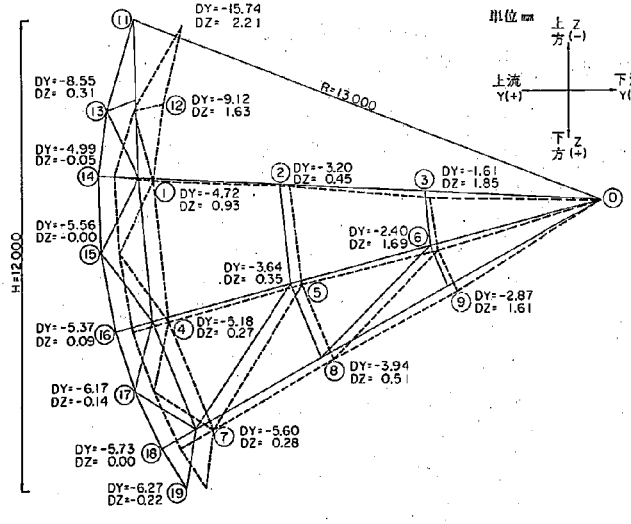
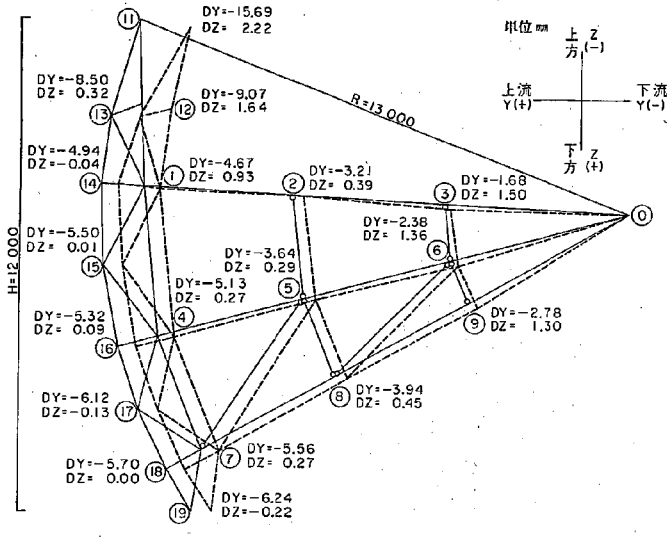


図7－3 Aゲート脚柱たわみ図

A3Pゲート脚柱たわみ図



A3Rゲート脚柱たわみ図

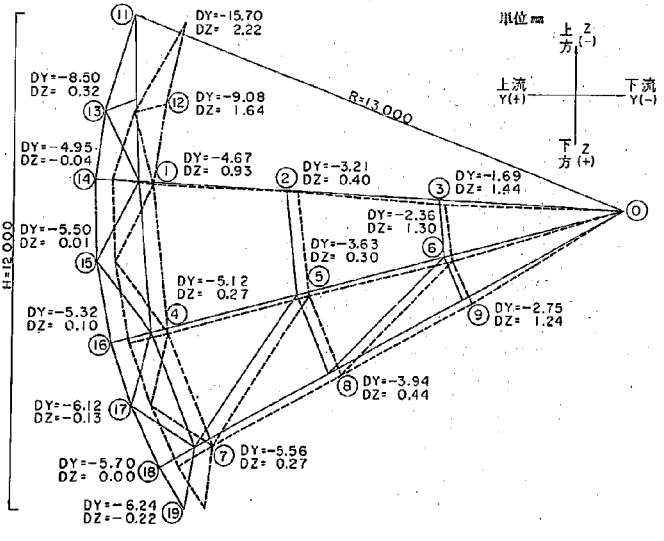
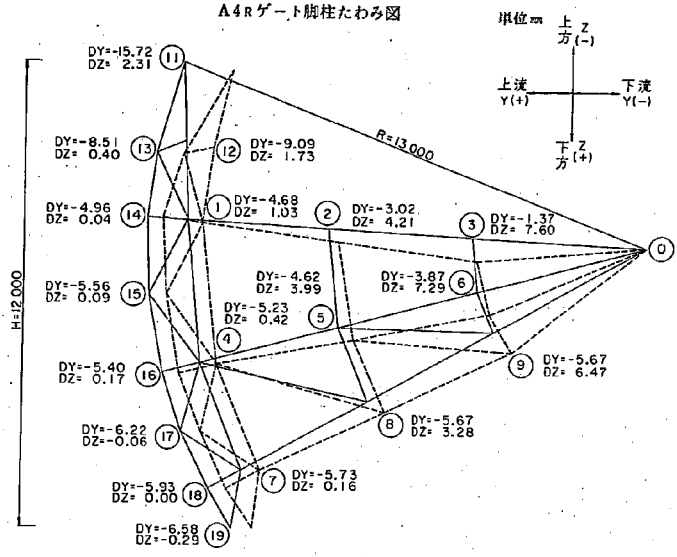


図7－4　Aゲート脚柱たわみ図

A4Rゲート脚柱たわみ図



A4Pゲート脚柱たわみ図

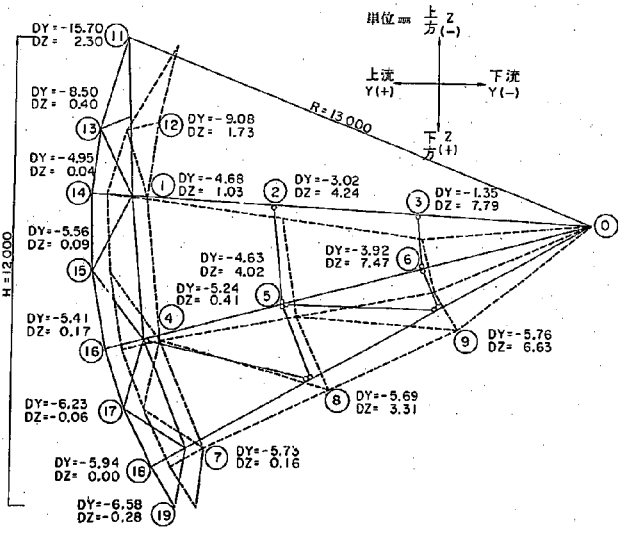
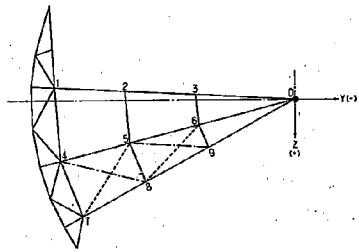


図7－5　Aゲート脚柱たわみ図

表2　Aゲート脚柱最大圧縮応力（kg/cm²）

位置	脚	節点	$A0_P$	$A0_R$	$A1_R$	$A2_P$	$A2_R$	$A3_P$	$A3_R$	$A4_P$	$A4_R$	2次元計算	許容応力
主桁取付部	上	①	−1550	−1040	−1060	−1020	−1020	−1000	−1000	−860	−860	−836	−903
	中	④	−930	−1360	−1240	−850	−850	−820	−820	−850	−850	−826	−950
	下	⑦	−1800	−1420	−1320	−920	−930	−900	−900	−1020	−1020	−850	−963
主桁側支柱取付部	上	②	−1070	−1040	−1170	−910	−910	−920	−930	−900	−890	−836	−903
	中	⑤	−960	−1200	−1430	−850	−1060	−860	−860	−930	−920	−826	−950
	下	⑧	−1260	−1300	−1400	−880	−880	−890	−890	−920	−930	−850	−963
トラニオン側支柱取付部	上	③	−1420	−1300	−1320	−1090	−1110	−1010	−1030	−860	−840	−836	−903
	中	⑥	−1550	−1490	−1410	−1190	−1220	−1110	−1140	−940	−900	−826	−950
	下	⑨	−1670	−1340	−1210	−1080	−1090	−1040	−1050	−940	−930	−850	−963
トラニオン部	上	⑩	−1360	−1420	−1450	−1400	−1400	−1100	−1100	−1100	−1100	−836	−903
	中	⑨	−1300	−1330	−1320	−1400	−1400	−980	−980	−950	−940	−826	−950
	下	⑧	−1450	−1120	−1160	−1240	−890	−970	−970	−990	−1000	−850	−963



図－8　Aゲート脚柱の格点番号

①事故を起した構造そのままのA0では，中間支持材を含む鉛直構造面内の曲げモーメント M_y によって大きな応力が発生しており，特に下脚と主桁との取付部⑦では，1420～1800kg/cm² となって，設計計算値850 kg/cm²の約2倍の応力が生じている。このゲートの事故技術調査委員会の報告[1]では，ゲート閉鎖時の初期のたわみが10～20mmあったと推定し，最大の20mmの初期のたわみを与えて諸荷重が作用したとき，この点で6.73^{t-m}の曲げモーメントが働くとしているが，本研究のように自重を外力の一部として取扱った解析でも3.14～5.43^{t-m}の曲げモーメントが働いている。

②中間支持材の断面2次モーメント I_y を脚柱のそれと等しくなるように，4600cm⁴～7300cm⁴にした$A1_R$でも，脚柱の応力は，I_y = 655cm⁴の$A0_R$と大差ない。したがって事故調査委員会の報告のように，中間支持材ならびに，その接合部の構造を充分剛にする配慮が望ましかったとする考え方では不十分である。

③ A0に斜材を入れたA2では，トラニオン付近を除けば応力値は著るしく改善されることが認められる。トラニオン付近の応力が高いのは，附表1に示すとおり水平面内の曲げモーメント M_z によるもので A2のトラニオン付近での水平面上での折れ曲りを取り除き脚柱をまっすぐにした A3では M_z はきわめて小さくなって，最大圧縮応力を1110～1140kg/cm² におさえることができる。このようなことから脚柱の平面形状をトラニオン付近で折り曲げることは避けなければならない。

④ A3の斜材の向きを変えて引張力が働くようにした A4では，最大圧縮応力は幾分低下するが A3と大差ない。そして通常の設計法に用いられる2次元計算値より200kg/cm² 程度大きくなるものもあるが過大なものではない。

⑤ A0では中間支持材の結合がヒンジのときと剛結のときとでは応力値のバラツキが大きいがトラス系のA3，A4では，ヒンジのときと剛結のときとではほとんど同じ値となっている。

(4)　中間支持材の断面力と応力

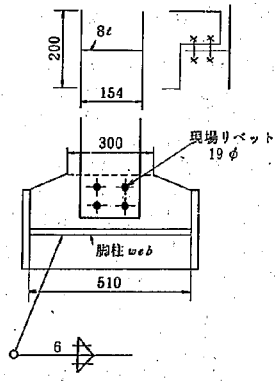
中間支持材についての断面力と応力は附表2のようになる。そして脚柱と同様に最大圧縮応力を求めると表3に示すとおりである。次にこれらについて考察を加えてみよう。

①事故を起した A0では，中間支持材の結合条件の相違によってバラツキが大きいことが認められる。また技術調査委員会報告が指摘しているように中間支持材の脚柱への取付けが，図9のように弱いので実際には$A0_P$に近いと考えられる。

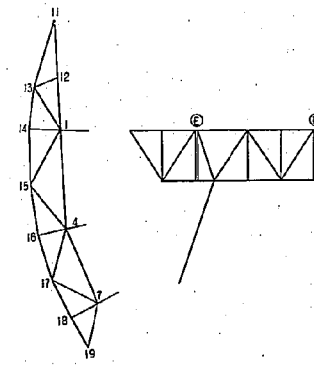
②脚柱の水平面内での折れ曲りをなくした A3および A4の比較では，A3の方が応力値が小さい。また，最大応力はトラニオンに近い垂直支柱に発生する。

表3　Aゲート中間支持材最大応力 (kg/cm²) (+)引張応力 (−)圧縮応力

部材名称	部材	応力の種類	$A0_P$	$A0_R$	$A1_R$	$A2_P$	$A2_R$	$A3_P$	$A3_R$	$A4_P$	$A4_R$
垂直支柱	3−6	3次元解析による応力	−30	−2450	−760	−430	−1230	−190	−810	−110	−1200
		2次元設計許容応力	軸圧−1037 曲げ−1075	軸圧−1037 曲げ−1075	軸圧−1074 曲げ−1083	軸圧− 877 曲げ− 980	〃	〃	〃	〃	〃
	6−9	3次元解析による応力	−40	+3140	+1080	+660	+1360	+210	+800	−210	−1420
		2次元設計許容応力	軸圧−1061 曲げ−1085	軸引+1200 曲引+1200	軸引+1200 曲引+1200	軸引+1200 曲引+1200	〃	〃	〃	軸圧−1024 曲げ−1026	〃
	2−5	3次元解析による応力	+10	−1670	−470	−60	−80	−60	−80	−60	−440
		2次元設計許容応力	軸引+1200 曲引+1200	軸圧− 897 曲げ−1022	軸圧−1017 曲げ−1045	軸圧− 707 曲げ− 715	〃	〃	〃	〃	〃
	5−8	3次元解析による応力	−30	−2240	−780	+290	+330	+270	+310	−280	−730
		2次元設計許容応力	軸圧− 964 曲げ−1047	軸圧− 964 曲げ−1047	軸圧−1044 曲げ−1068	軸引+1200 曲引+1200	〃	〃	〃	軸圧 −836 曲げ −841	〃
斜材	3−5	3次元解析による応力	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6−8	〃	—	—	—	−980	−1050	−900	−1000	—	—
	2−4	〃	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5−7	〃	—	—	—	−510	−580	−530	−600	—	—
	5−9	〃	—	—	—	—	—	—	—	+630	+670
	4−8	〃	—	—	—	—	—	—	—	+480	+570



図−9　中間支持材の取付け



図−10　Aゲート縦トラスの格点番号

(5) 水平主桁間の縦トラスの断面力と応力

主桁間の縦トラスの断面力，断面特性および応力は附表3のとおりである。そのうち最大応力をまとめると表4のようになる。なお，解析に用いた格点の番号は図10のとおりである。

これらによると，脚柱に近いトラスの応力が高く特に上の主桁を固定するための斜材の軸力が大きいため

表4　Aゲート主桁間の縦トラスの最大応力

	部材 / ケース名	11－12	12－1	1－4	4－7	7－19	12－13	13－1	1－15	15－4	4－17	17－7
Eトラス	A 0p	−1046	− 999	− 696	−57	−1024	− 564	−1204	−1527	− 27	−1100	− 116
	A 2p	−1087	−1080	− 529	−43	− 816	− 593	−1271	−1354	− 83	− 852	− 418
	A 3p	−1088	−1081	− 530	−46	− 819	− 594	−1272	−1351	− 93	− 804	− 415
Kトラス	A 0p	− 923	− 875	− 465	− 224	− 538	− 223	− 840	− 765	+ 277	+ 272	− 127
	A 2p	− 888	− 841	− 438	− 139	− 501	− 215	− 809	− 761	+ 265	+ 265	− 218
	A 3p	− 887	− 840	− 436	− 136	− 499	− 214	− 808	− 766	+ 271	+ 271	− 222
部材特性	2次元解析による応力	− 214	− 287	−	−	−	−	−	− 150	+ 150	− 106	− 106
	2次元設計許容軸方向応力	− 785	− 874	−	−	−	−	− 857	− 735	+1150	− 857	− 857
	2次元設計許容曲げ応力	− 972	−1018	−	−	−	−	−1010	− 957	+1150	−1010	−1010
	細長比	74	72	134	106	54	30	67	80	74	65	63

過大な応力となっている。そして全部材の軸応力が設計に用いた2次元計算よりきわめて大きく特に1～15では，150kg／cm² に対し脚柱を静定系にして安定化したものでも1350kg／cm² もの圧縮応力が発生している。

また，脚柱間の中間支持材に斜材を入れたトラス系の方が，やや低い応力を示している。

〔2〕　Bゲート

(1)　Bゲートの骨組構造

Bゲートは図11に示すとおり脚柱の断面は充分大きくスレンダーではないが，中間支持材がラーメン状の構造で昭和38年5月11日に破壊事故を起したものである。（写真2）　脚柱は主桁取付部で，腹板の幅700 mm，A＝142 cm²，Iy＝5400cm⁴ トラニオンピンで腹板の幅340 mm，A＝132 cm²，Iy＝5400cm⁴ に変化しており，脚柱図の中間支持材は，A＝79.4cm²，Iy＝4052cm⁴ の断面特性をもっている。

中間支持材と脚柱との結合は，十分剛でラーメン構造となっている。

なお，事故の原因としては次のような主旨の報告がある。

扉体と主脚連結部については応力集中をさけるべくとった形状は，設計計算上許容内に納まり誤りは認められないが，溶接による応力集中が生じた。

すなわち結合部付近の構造上の配慮が不足していた

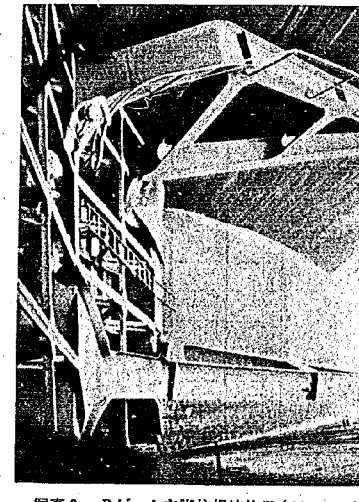
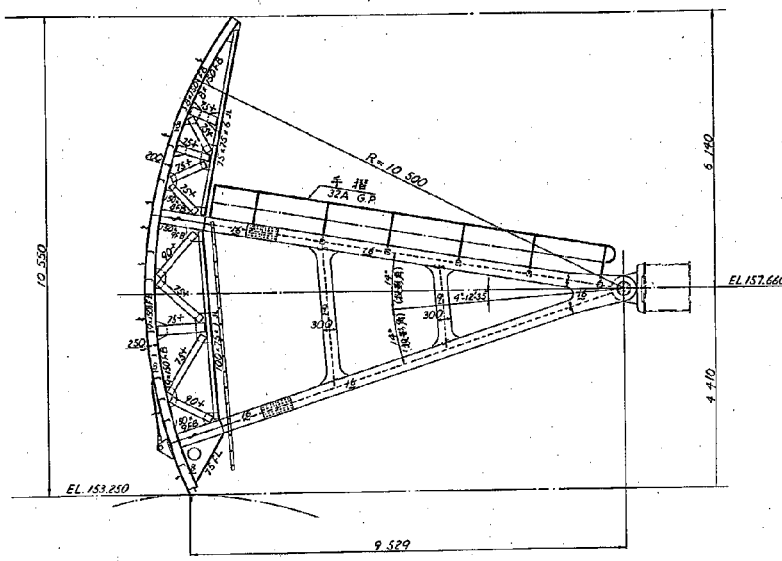


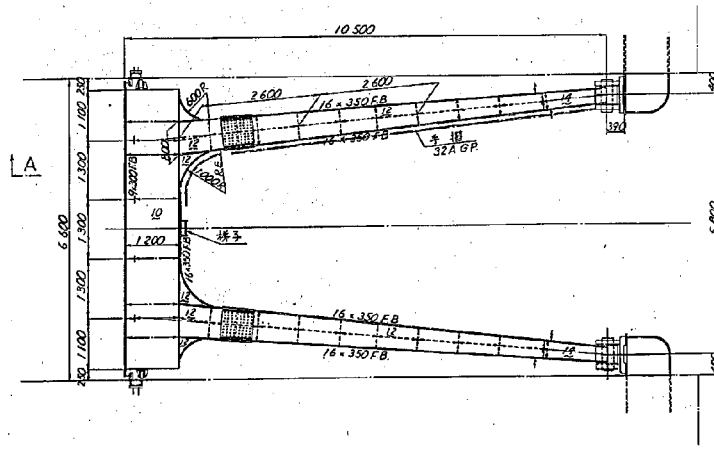
写真2　Bゲート主脚柱損壊状況（38. 5. 13）

点と最終継手の際，施工上の無理を除去する継手を採用するべき工作上の配慮に欠け，ここに内部応力が集中し水圧と合わせ扉体と主脚結合部附近に座屈を生じ

側面図



主桁及脚柱



図－11 Bゲート一般図

主脚柱の損壊を来たしたものと考えられる。

(2) 脚柱のたわみ

解析によって得られた脚柱のたわみは図12に示すとおりであり，格別大きいものではない。

(3) 脚柱および中間支持材の断面力と応力

解析によって求められた脚柱および中間支持材について断面力と応力を示せば，附表4のとおりである。これから主要な部分の応力をまとめると表5のようになる。この表には設計に用いた2次元計算による応力と許容応力を付記した。なお，解析に用いた格点の番号は図13のとおりである。

表5による脚柱の最大圧縮応力は約1150kg/cm²であり，2次元計算値650kg/cm²よりかなり大きいが，許容応力995kg/cm²を超えているとはいえ座屈を超すほど大きいとは考えにくい。したがってこのゲートの事故の原因として溶接の残留応力によるものと考えられていたことは妥当なもので，製作には改めて注意を要する。

中間支持材の応力は My によるものでさほど大きくない。なお $A1_R$ ではバラツキが大きいのに，B ではほぼ等しい応力値となっているが，その理由は明らかでない。

(4) 水平主桁間の縦トラスの断面力と応力

水平主桁間の縦トラスのうち，脚柱に接続するⒷトラスの断面力と応力を示せば表10のとおりである。

また，最大応力をまとめると，表－6のようになる。

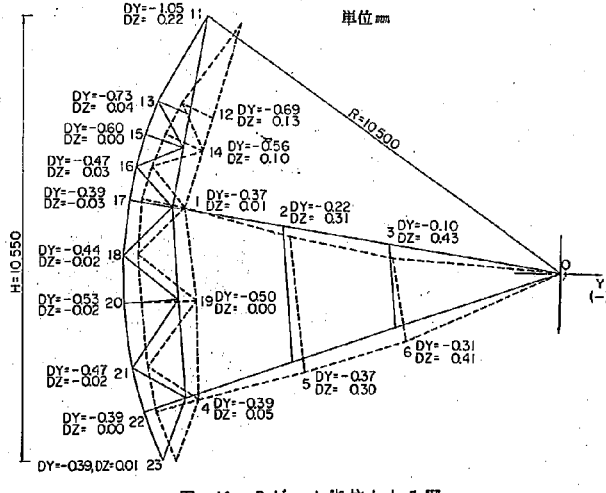
表5－1　Bゲート脚柱の最大圧縮応力（kg/cm²）

位置	脚	節点	ケース1	2次元解析による応力	2次元設計許容応力
主桁取付部	上	1	－1013	－540	－996
	下	4	－931	－540	－996
主桁側支柱取付部	上	2	－1055		
	下	5	－990		
トラニオン側支柱取付部	上	3	－1148		
	下	6	－1126		
トラニオン部	上	0	－914	－652	－996
	下	0	－846	－652	－996

表5－2　Bゲート中間支持材最大応力（kg/cm²）
(+) 引張応力
(−) 圧縮応力

部材応力	部材	応力の種類	B
垂直支柱	3－6	3次元解析による応力	－699
		2次元設計許容応力	軸圧 －1063 曲げ －1075
	2－5	3次元解析による応力	－617
		2次元設計許容応力	軸圧 －1004 曲げ －1039

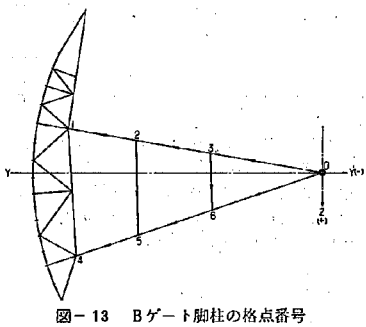
なお解析に用いた格点番号は，図－14のとおりとする。これによると応力値は，極端に大きいとは言えないが，上の主桁に接続してこれを固定する部材の応力が大きい。これは設計に用いた2次元計算値より大きな軸力が作用することによるものである。



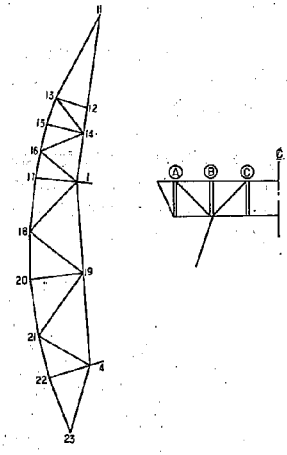
図－12　Bゲート脚柱たわみ図

表6　Bゲート主桁間縦トラスの最大応力（kg/cm²）

	部材	11−12	12−14	14−1	1−19	19−4	4−23	13−12	13−14	15−14	14−16	16−1	1−18	18−19	19−20	19−21	21−4
Aトラス	3次元解析による応力	−325	−583	−1115	−269	+336	−468	−689	−554	−595	+766	−1153	−961	+852	−828	+316	−744
Bトラス	3次元解析による応力	−355	−545	−1199	+324	+466	−486	−619	−665	−483	+644	−970	−1012	+927	−995	+354	−727
Cトラス	3次元解析による応力	−294	−466	−1060	−289	+372	−605	−437	−614	−431	+634	−889	−952	+848	−885	+275	−747
部材特性	部材	11−12	12−14	14−1	1−19	19−4	4−23	13−12	13−14	15−14	14−16	16−1	1−18	18−19	19−20	19−21	21−4
	2次元解析による応力	−168	−168	−543	+57	+378			−321	−229	+476	−843	−850	+717	−677	+184	−618
	2次元設計許容軸力内応力	−846	−846	−982	+1150	+1150			−990	−1015	+1150	−981	−970	+1150	−967	+1150	−987
	2次元設計許容曲げ応力	−1002	−1002	−1039					−1030	−1041		−1026	−1022		−1019		−1029
	細長比	70	70	42					40	32		42	45		46		41



図−13　Bゲート脚柱の格点番号



図−14　Bゲート縦トラスの格点番号

〔3〕Cゲート

(1)　Cゲートの構造

Cゲートは，図15に示すように比較的小形のもので十分余裕のある断面を用いている。

昭和51年に脚柱腹板に取付けてあった開度指示装置の溶接部がはずれ，調査したところ腹板が波打っていることが判明したので斜材（等辺山形鋼−90×90×7）を入れて補強した。（写真3）

ラーメン系の元設計をC0，斜材を入れた補強設計をC1として解析した。解析に用いた格点の番号は図16に示すとおりである。

(2)　脚柱および中間支持材の断面力と応力

解析によって得られた脚柱および中間支持材の断面力と応力は附表6のとおりである。そのうち，主要な部分の応力をまとめると表7のようになる。

問題を起したC0$_R$の脚柱の最大圧縮応力は1180kg/cm²

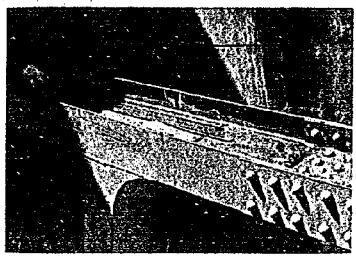
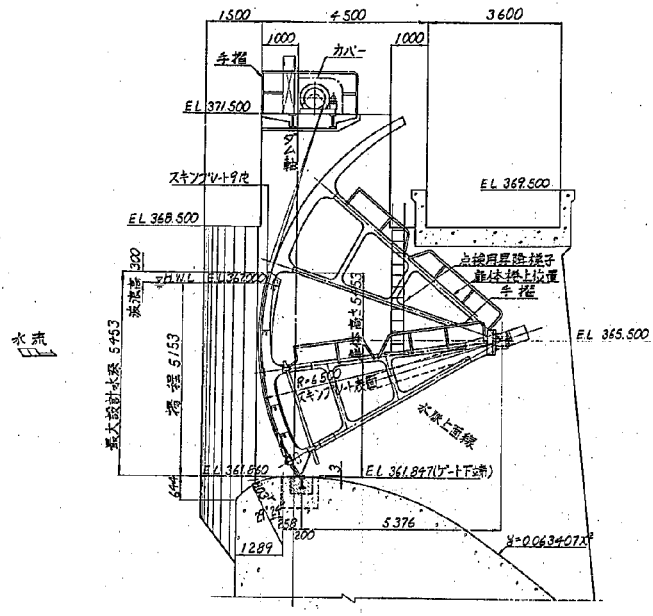
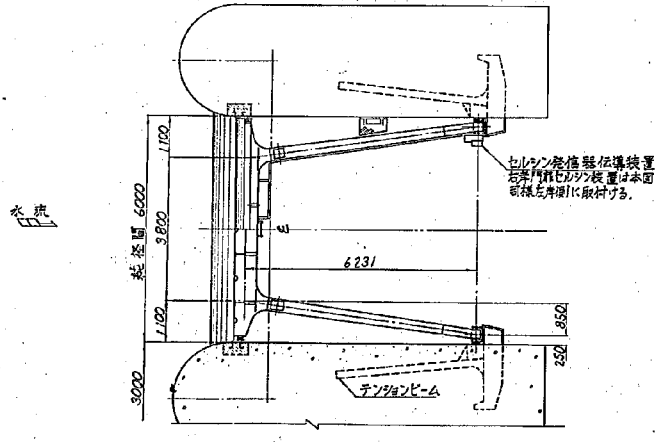


写真3　Cゲート脚柱腹板の変状

側 面 図



扉 体 平 面 図



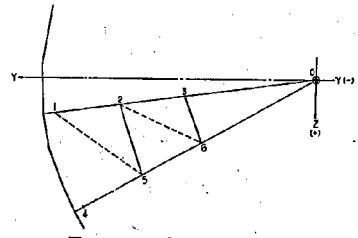
図－15 Cゲート一般図

表7－1　Cゲート脚柱最大圧縮応力（kg/cm²）

位置	脚	節点	$C0_R$	$C1_R$	2次元解析による応力	2次元設計許容応力
主桁取付部	上	1	－622	－860	－717	
	下	4	－636	－633	－717	
主桁側支柱取付部	上	2	－1180	－766	－772	(-905)
	下	5	－1123	－696	－772	(-905)
トラニオン側支柱取付部	上	3	－983	－943		
	下	6	－926	－826		
トラニオン部	上	0	－705	－706	－581	
	下	0	－671	－664	－581	

表7－2　Cゲート中間支持材最大応力（kg/cm²）
(+) 引張応力　(−) 圧縮応力

部材名称	部材	応力の種類	$C0_R$	$C1_R$
垂直支柱	3－6	3次元解析による応力	－898	－557
		2次元設計許容応力	軸圧 －1034 曲げ －1070	軸圧 －1034 曲げ －1070
	2－5	3次元解析による応力	－1005	－157
		2次元設計許容応力	軸圧 －947 曲げ －1028	軸圧 － 947 曲げ －1028
斜材	2－6	3次元解析による応力	——	＋90
		2次元設計許容応力	——	軸引 ＋1200 曲げ ＋1200
	1－5	3次元解析による応力	——	＋100
		2次元設計許容応力	——	軸引 ＋1200 曲げ ＋1200



図－16　Cゲート脚柱の格点番号

で極端に大きいとは云えないが設計計算値 772kg/cm², 許容応力 905kg/cm² に比べると約 200kg/cm² 高い。そしてその原因は設計計算では，取入れられていない My によるものである。細い斜材（90×90×7）を入れた $C1_R$ では My も小さくなり，最大で 943kg/cm² と大幅に改善されている。

中間支持材の垂直支柱は $C0_R$ では My が大きいため最大 1005kg/cm² あったものが，斜材を入れた $C1_R$ では最大 557kg/cm² になって半減している。

〔4〕Dゲート

(1) Dゲートの骨組構造

Dゲートは図17に示すとおり，脚柱の中間支持材がラーメン構造のものとしては大型のゲートである。

そして過大な応力が発生していることが確かめられ，この研究に基づいて補強された。ここでは補強前と後の両者についての解析結果をのべる。

①ケース $D0_R$

脚柱は，主桁取付部で腹板の幅 1200 mm $A=440.8$ cm² $Iy=52135$ cm⁴，トラニオンピン腹板の幅 568 mm, $A=368.8$ cm², $Iy=52115$ cm⁴ に変化しており，脚柱間の中間支持材は，$A=174$ cm², $Iy=8295$ cm⁴ の断面特性をもっている。中間支持材と脚柱との結合部は十分剛でラーメン構造となっている。

②ケース $D1_R$

ケース $D0_R$ で中間支持材がラーメン構造となっているが，これに斜材を入れてトラス系として補強したのが $D1_R$ である。

この斜材は 130×130×9 の等辺山形鋼で $A=22.7$ cm², $Iy=366$ cm⁴ である。

(2) 脚柱のたわみ

脚柱のたわみは図18に示すとおりで，たわみの値は大きくないが，トラス系とした $D1_R$ はラーメン系の $D0_R$ に較べると半減している。

(3) 脚柱および中間支持材の断面力と応力

脚柱および中間支持材の断面力と応力は附表7のとおりである。そのうち主要な部分の最大応力をまとめると，表8のようになる。なお，解析に用いた格点番号は図19のとおりである。

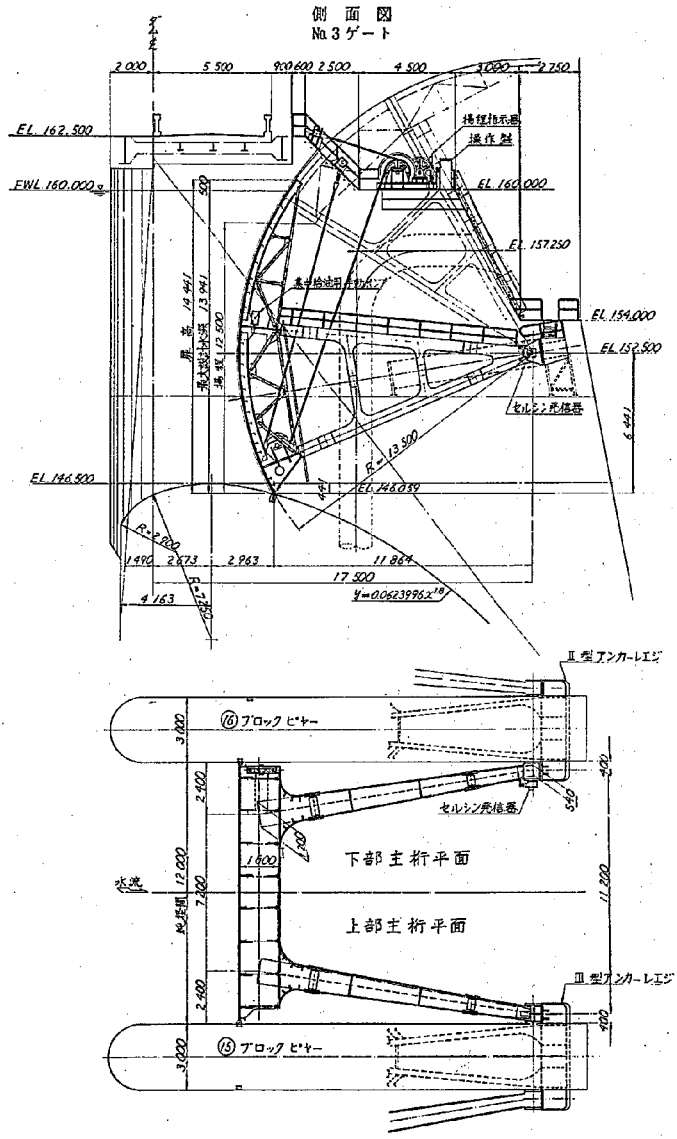
$D0_R$ の脚柱の最大圧縮応力は，1194 kg/cm² で極端に大きいとはいえないが，斜材を入れて静定系とした $D1_R$ では 932 kg/cm² に低下する。

中間支持材は不静定系の $D0_R$ で My および Mz の影響が強く働き 1786kg/cm² の圧縮応力となってきわめて高いが，静定系とした $D1_R$ では 1040 kg/cm² に低下する。

(4) 水平主桁間の縦トラスの断面力と応力

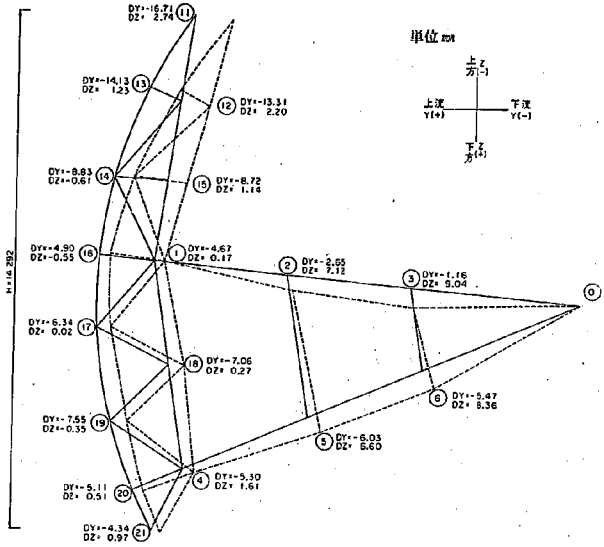
水平主桁間の縦トラスのうち，脚柱に接続する Ⓑ トラスの断面力と応力を示せば附表8のとおりである。そして他のトラスを合わせて最大応力をまとめると表9のようになる。なお解析に用いた格点番号は図20のとおりである。

これらの結果によると水平主桁に接続してこれを固定するための斜材に大きな圧縮応力が働く。その値は脚柱に接続する Ⓑ トラスで最大となり，1－17部材では不静定系の $D0_R$ で 1829 kg/cm² もの大きな値になるが，

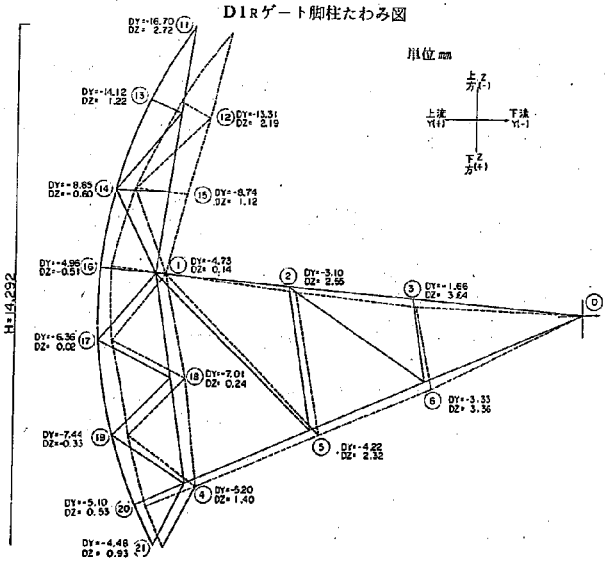

側面図
No.3ゲート
EL. 162.500
FWL 160.000
EL. 160.000
EL. 157.250
EL. 154.000
EL. 152.500
EL. 146.500
EL. 146.039
操程指示器
操作盤
セルシン発信器
R=13.500
R=2.800
y=0.0623996x^1.9
II型アンカーレイジ
III型アンカーレイジ
⑯ブロックピヤー
⑮ブロックピヤー
下部主桁平面
上部主桁平面
水流

図－17　Dゲート一般図

DORゲート脚柱たわみ図



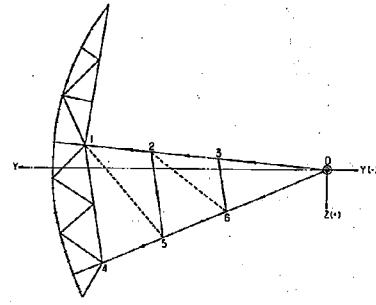
D1Rゲート脚柱たわみ図



図－18　Dゲート脚柱たわみ図

表8－1　Dゲート脚柱の最大圧縮応力（kg/cm²）

位置	脚	節点	$D0_R$	$D1_R$	2次元解析による応力	2次元設計許容応力
主桁取付部	上	1	−1074	−781	−758	
	下	4	−967	−734	−758	
主桁側支柱取付部	上	2	−1058	−806		
	下	5	−922	−854	−872	−1032
トラニオン側支柱取付部	上	3	−1194	−982	−872	−1032
	下	6	−1189	−853		
トラニオン部	上	0	−969	−976	−928	−999
	下	0	−803	−787	−928	−999



図－19　Dゲート脚柱の格点番号

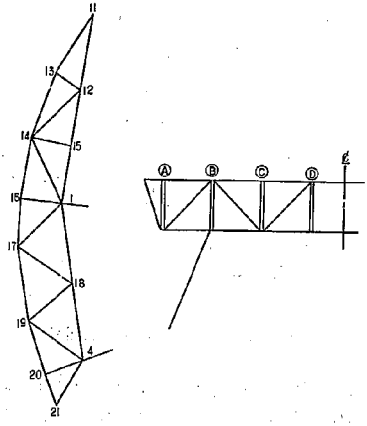
表8－2　Dゲート中間支持材最大応力（kg/cm²）
(+) 引張応力　(−) 圧縮応力

部材名称	部材	$D0_R$	$D1_R$	2次元解析による応力	2次元設計許容応力
垂直支柱	3－6	−1786	−1040	−36	−984
	2－5	−1514	−480	−36	−854
斜材	2－6		+357		
	1－5		+449		

静定系の$D1_R$では1394 kg/cm² に低下する。その低下はM_yの減少によるものであるが，なお高い応力値を示しているのは軸力が大きいためであり，設計に用いる2次元計算値とかなり異なる値を示すことは注意を用する。

表9　Dゲート主桁間縦トラスの最大応力（kg/cm²）

	部材 / ケース名	11－12	12－15	15－1	1－18	18－4	4－21	13－12	12－14	14－15	14－1	1－17	17－18	18－19	19－4
Aトラス	ケース1	−53	−593	−729	−390	+555	−246	−769	+627	−603	−994	−1051	+1008	−842	−734
	ケース2	−53	−596	−716	−370	+527	−217	−774	+626	−601	−1004	−1042	+970	−797	−708
Bトラス	ケース1	−96	−525	−453	−444	+1052	−347	−768	+649	+509	−1041	−1829	+1237	−906	−967
	ケース2	−91	−508	−688	−229	+997	−830	−772	+650	+525	−1184	−1324	+1129	−855	−1334
Cトラス	ケース1	−114	−543	−712	−147	+981	−203	−878	+639	+566	−1148	−1256	+1065	−850	−1188
	ケース2	−114	−543	−698	−156	+945	−179	−891	+636	+567	−1148	−1242	+1044	−841	−1223
Dトラス	ケース1	−66	−584	−733	−94	+948	−129	−773	+627	+507	−1095	−1154	+1072	−856	−1079
	ケース2	−65	−579	−730	−91	+959	−125	−775	+625	+503	−1092	−1151	+1070	−867	−1082
部材特性	2次元解析による応力	−94	−504	−508	+217	+727	−631	−833	+717	+6	−883	−844	+709	−711	−788
	2次元設計許容軸方向応力	−658	−639	−658	+1150	+1150	−1022	−1013	+1150	+1150	−911	−973	+1150	−805	−973
	2次元設計許容曲げ応力	−995	−992	−995			−955	−1087			−982	−1032		−1032	−1032
	細長比	53	49	50	53	53	45	41	60	32	62	50	49	49	47



図－20　Dゲート主桁間縦トラスの格点番号

5　脚柱の立体的挙動と現行設計法の関係についての考察

〔1〕脚柱の構造

テンターゲートの脚柱と主桁は平面形状でπ形のラーメンとして脚柱は2段以上にするが，脚柱と中間支持材を含む鉛直構造についての設計の規定はない。そのため構成方法としては，ラーメン構造，Kトラス構造，およびプラットトラス構造の3種のものが採用されているのが現状である。

この報告ではラーメン構造のものを主体として，これをトラス構造に改良したものについても論及したが，ラーメン構造のゲートではすべてのゲートに現行の設計方法では算出できない大きな2次応力が発生していることが明らかとなった。これに反し，トラス構造のものではかなり細い断面の斜材を入れたものでも2次応力は大幅に減少し，通常用いている設計計算によって算出される応力と大差のない応力値となることが示されている。

したがって，脚柱と中間支持材を含む鉛直構造は，全体がピン結合であると仮定したとき，静定反力数は3であるから，部材数をm，格点数をjの間に

$$m+3=2j$$

の関係をもたせ，いわゆる静定系となるように設計することに規定することが望まれる。もし，不静定系とする場合には慎重な検討を要する。

次に脚柱の平面形状をトラニオン中心よりやや上流側で折り曲げると平面内のみならず，面外にも大きな曲げモーメントが発生することが示されている。したがって脚柱の平面形状を折り曲げてはならない。

〔2〕中間支持材の断面

中間支持材をプラットトラス構造とするとき，斜材は引張部材となり，応力値も大きくないので細長比ℓ/rを240以下（水門鉄管技術基準第20条）とし，さらに最小板厚を8㎜以上（水門鉄管技術基準第20条解説，中形以上の水門扉の項）にすればよい。

垂直支柱は安全をみて主要部材とみなし，細長比ℓ/rを120以下（水門鉄管技術基準第20条）とし，さらに最小板厚を8㎜以上（水門鉄管技術基準第20条解説，中形以上の水門扉の項）とする条件を最長部材について満足するように断面を決定し，全部材に採用するのがよい。

なお，垂直支柱の脚柱への取付けは，剛性の高いフランジに接合することとする。

〔3〕たわみ

脚の設計では，自重によるモーメントやたわみは省略され，また部材の初期たわみについても製作上の制限があると考え無視されるのが普通であり，これらについての規定はない。Aゲートでは，この影響があると考えられる事故が発生したが，この研究によれば，部材を静定系となるように配置することによって，たわみはきわめて小さくなり，脚柱の全体としての剛性が増大する。

〔4〕溶接の残留応力

本報告で行なった応力解析法によれば，Bゲートの脚柱は最大1148kg/cm²の圧縮応力が発生しただけで，破壊事故を起こしたし，Cゲートの脚柱では最大1180kg/cm²の圧縮応力で腹板に変状を来たした。これらの値は水門鉄管技術基準で規定する値を越しているとはいえ，2次応力を含めた値であるし，道路橋示方書[6]等で定められる許容応力に較べて過大なものではない。したがって，ゲート製作時の溶接に伴なう残留応力が影響したと考えざるを得ないので，よくいわれていることではあるがこれに対する配慮を怠ってはならない。

なお，すでにのべたとおり，中間支持材をトラス構造とすることによって，脚柱の全体としての剛性が増し応力値が低下するので有利となる。

〔5〕水平主桁間の縦トラス

水平主桁を固定するため扉体に設ける縦トラスの応力は，脚柱と中間支持材の構造の影響を受け，その構造が静定系となるとき応力値が低下する。

縦トラス部材のうち，主桁に直接結合される斜材では大きな応力が生じることがある。そして，脚柱に近

いトラスに最大の圧縮応力を生じるが，他のトラスでも応力値が大きいため脚柱付近に集中して荷重の配分がなされるのではなく，構造上2次応力が大きくなるもののようである。BゲートとDゲートの解析によれば，ここで指定した斜材については，慣用される設計計算で求められる軸力よりも50%程度大きな軸力が作用することにして断面を決定すればよいようである。

〔6〕設計計算方法

テンターゲート全体は立体的な構造であるから，これを立体構造として設計すべきであるとする考え方がある。そのようにすると，設計の実務はきわめて煩雑になる。

クレストテンターゲートの設計では，現行の設計基準にこの報告でのべた修正を加えることによって，いくつかの平面形状に分割したいわゆる2次元計算を行なう慣用の設計を行なっても，十分安全でかつ経済的な結果が得られる。

設計基準に定める条項は，これに従って設計する限り構造物が安全であることを保証するとともに，設計作業が単純化されるべきものである。したがって，いくら問題があるからとはいえ，設計体系が3次元応力解析を必要とするように改めることは，いたずらに複雑化するだけで避けたいことである。

〔7〕主桁配置

和知ダムゲートの事故以来，脚柱を2段形式とし，さらに縦の主桁に限定するという傾向が強くなっている。この研究の結果でも水平主桁の固定には注意を要することが明らかになっているので水平主桁の間に鉛直なガーターを配置するのは良い設計である。

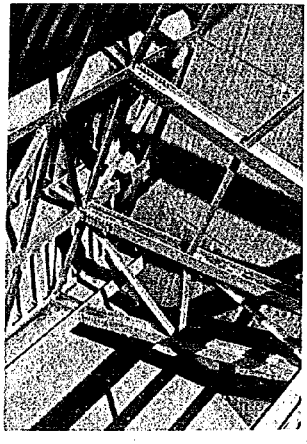


写真4　Folsomダム，4段脚柱のテンターゲート（岩崎氏）

しかし，上述のように限定しなければならないという理由は見当らない。特に，脚柱を2段に限定する必要はなく，大きなテンターゲートでは，むしろ，脚柱の段数をふやした方が合理的で，かつ経済的な設計となるものと考えられる。そしてガーターは水平主桁だけとしても充分に対処できるものと考えられる。このような設計として岩崎正亮氏による米国カリフォルニア州のFolsomダム（U.S.B.R）のクレストゲートの例を写真4に示す。

6　結　論

この研究の結果によると，クレストテンターゲートの慣行の2次元設計法に，次にあげる修正を加える必要がある。

(1)　脚柱と中間支持材を含む鉛直構造は，静定トラス組となるような数の中間支持材を入れることとし，ラーメン構造は避けた方がよい。もし，ラーメン構造とするときは，2次応力について慎重な検討をする必要がある。

(2)　脚柱の平面形状をトラニオン付近で折り曲げてはならない。

(3)　平面主桁を固定するための縦トラスのうち主桁に連結される部材は，現行設計法によって求められる断面より50%以上大きな断面とした方がよいようである。

また，製作にあたっては溶接の残留応力を小さくするよう充分な配慮をしなければならない。

なお，テンターゲートの設計にあたって3次元計算を行なうように規定することは，いたずらに設計作業を複雑にするだけであり，2次元計算だけでも上記の修正を行なうことにより充分安全で，かつ経済的な設計を行なうことができる。

7　あとがき

クレストテンターゲート全体の立体的挙動解明のため事故を起こしたものを中心に3次元解析を行い，主として現設計法の改良点について論じた。

本研究に際しては，諸資料の提供などで多大の御協力を頂いた現地事務所，当初に貴重な御助言を頂いた建設省河川局開発課，現水源地対策室長，広瀬利雄氏，同課長補佐，豊田高司氏に深甚の謝意を表します。

さらに，研究を進めるに当っては，3次元解析プログラムで日本IBM(株)の故西辻正彦氏，大阿久昌彦氏，ゲート構造で(株)栗本鉄工所の吉田治氏，石川島播磨

重工(株)の林正輝氏，(株)丸島水門製作所の岩崎正亮氏，諸計算，資料整理では建設省土木研究所ダム構造研究室，尾川友義技官，矢沢克敏技官の御協力を得ましたことについても深く感謝する次第です。

参 考 文 献

1) 和知ダムゲート事故技術調査委員会「和知ダムゲート事故原因調査報告」(昭和43年3月)
2) 水門鉄管協会「水門鉄管技術基準」(昭和48年3月)
3) S. Timoshionko : Theory of Elasticity, Chap 11, 98, Torsion of Rolled Profile Section,
4) 林毅編「軽構造の理論とその応用(上)」(1967年10月) 日本科学技術連盟,
5) 水門鉄管協会「水門鉄管No. 85」(昭和49年3月)
6) 日本道路協会「鋼道路橋設計示方書」(昭和47年3月)
7) 日本建築学会「鋼構造設計基準」(1970年制定)

(昭和52年1月 原稿受理)

附表 1－1　A ゲート脚柱の断面力と応力　AO_P（AO_R）

単位　断面力＝kg，kg・cm
　　断面積＝cm²
　　応　力＝kg／cm²

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
上脚	0－3	0	114,920	141.9	810	16,331	45.9	356	−11	96.0	0	58,285	4,610	152	1,118,500	77,350	398	2,100	140	30	−1,360	
			(118,420)		(835)	(16,871)		(368)	(536)		(6)	(62,595)		(163)	(1,178,200)		(419)	(1,750)		(25)	(−1,417)	
		3	−116,050		−818	265		6	−473		−5	212,520		553	125,240		44	490		7	−1,415	
			(−119,590)		(−843)	(203)		(4)	(−953)		(−10)	(−142,38)		(−37)	(120,390)		(43)	(420)		(6)	(−923)	
	3－2	3	116,090		818	−330		−7	117		1	213,740		−556	123,920		−44	−258		−4	−1,418	
			(117,100)		825	(−321)		(−7)	(357)		(4)	(−168,570)		(−439)	(−116,630)		(−42)	(−134)		(−2)	(−1,306)	
		2	−116,070		−818	330		7	−527		−6	94,735		247	1,773		1	258		4	−1,066	
			(−117,070)		(−825)	(321)		(7)	(−767)		(−8)	(−39,472)		(−103)	(−1,956)		(−1)	(134)		(2)	(−929)	
	2－1	2	116,040		818	−353		−8	739		8	−94,806		−247	−1,696		−1	214		3	−1,066	
			(116,140)		(818)	(−361)		(−9)	(343)		(4)	(−84,958)		(−221)	(3,804)		(1)	(34)		(0)	(−1,040)	
		1	−116,010		−818	353		8	−1,158		−12	−263,870		−687	−131,780		47	−214		−3	−1,552	
			(−116,120)		(−818)	(361)		(9)	(−762)		(−8)	(−123,790)		(−322)	(−140,130)		(−50)	(−34)		(0)	(−1,190)	
中脚	0－6	0	127,390	157.9	807	18,342	45.9	400	−154	112.0	−1	−17,971	7,310	−34	1,467,700	88,550	456	2,880	162	36	−1,297	
			(129,020)		(817)	(18,449)		(402)	(846)		(8)	(−39,309)		(−75)	(1,390,800)		(433)	(2,480)		(31)	(−1,325)	
		6	−128,850		−816	67		2	−358		−3	380,960		730	−4,864		−2	720		9	−1,548	
			(−130,470)		(−826)	(156)		(3)	(−1,362)		(−12)	(−48,265)		(−92)	(50,126)		(16)	(560)		(7)	(−934)	
	6－5	6	128,910		816	−138		−3	630		6	−382,590		−733	5,358		2	244		3	−1,551	
			(128,960)		(817)	(−156)		(−3)	(944)		(8)	(−344,390)		(−660)	(−36,073)		(−11)	(−154)		(−2)	(−1,488)	
		5	−129,020		−817	138		3	−1,074		−10	67,441		129	−56,335		−18	244		3	−964	
			(−129,080)		(−817)	(156)		(3)	(−1,388)		(−12)	(−87,134)		(−167)	(−21,300)		(−7)	(154)		(2)	(−991)	
	5－4	5	129,120		818	−193		−4	48		0	−67,497		129	55,647		17	−45		−1	−964	
			(128,540)		(814)	(−166)		(−4)	(1,013)		(9)	(−199,820)		(−383)	(30,885)		(10)	(−20)		(0)	(−1,207)	
		4	−129,240		−818	193		4	−502		−4	−36,303		70	−128,700		−40	46		1	−926	
			(−128,660)		(−815)	(166)		(4)	(−1,467)		(−13)	(−268,730)		(−515)	(−93,762)		(−29)	(20)		(0)	(−1,359)	
下脚	0－9	0	147,220	171.0	861	21,157	51.0	415	−306	120.0	−3	−40,313	9,004	−67	1,814,700	95,300	524	3,382	177	38	−1,452	
			(142,180)		(831)	(20,283)		(398)	(577)		(5)	(−23,286)		(−39)	(1,585,100)		(249)	(2,848)		(32)	(−1,119)	
		9	−149,030		−872	124		2	−344		−3	450,740		751	−165,460		−48	801		9	−1,671	
			(−143,900)		(−842)	(198)		(4)	(−1,226)		(−10)	(47,404)		(79)	(−28,232)		(−4)	(523)		(7)	(−925)	
	9－8	9	149,070		871	112		2	433		4	−452,810		−754	163,870		47	−344		−4	−1,672	
			(147,930)		(865)	(−85)		(−2)	(482)		(4)	(−280,900)		(−468)	(41,142)		(6)	(−172)		(−1)	(−1,339)	
		8	−149,310		−873	−112		−2	−868		−7	212,000		353	−122,320		−35	344		4	−1,261	
			(−148,170)		(−866)	(85)		(2)	(−917)		(−8)	(220,033)		(37)	(−72,607)		(−11)	(172)		(1)	(−914)	
	8－7	8	149,430		874	135		3	1,776		15	−212,090		−353	122,260		35	237		3	−1,262	
			(149,850)		(876)	(−120)		(−2)	(1,109)		(9)	(−189,170)		(−315)	(82,824)		(13)	(−27)		(0)	(−1,204)	
		7	−149,680		−875	−135		−3	−1,221		−18	−543,380		−905	−71,164		−20	−238		−3	−1,800	
			(−150,090)		(−878)	(120)		(2)	(−1,554)		(−13)	(−314,190)		(−523)	(−128,050)		(−20)	(26)		(0)	(−1,421)	

附表1－2　Aゲート脚柱の断面力と応力（$A1_R$）

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
上脚	0－3	0	(120,440)	(141.9)	(849)	(17,186)	(45.9)	(374)	(856)	(96.0)	(9)	(63,773)	(4,610)	(166)	(1,213,100)	(77,350)	(431)	(630)	(140)	(9)	(−1,446)	
		3	(−121,530)		(−857)	(182)		(4)	(−1,272)		(−13)	(−159,860)		(−416)	(118,700)		(42)	(361)		(2)	(−1,315)	
	3－2	3	(117,900)		(831)	(−304)		(−7)	(483)		(5)	(−137,360)		(−358)	(−113,530)		(−40)	(−59)		(0)	(−1,229)	
		2	(−117,880)		(−831)	(304)		(7)	(−893)		(−9)	(−117,150)		(−305)	(922)		(0)	(59)		(0)	(−1,136)	
	2－1	2	(116,100)		(818)	(−368)		(−8)	(340)		(4)	(−135,650)		(−353)	(2,640)		(1)	(−69)		(0)	(−1,172)	
		1	(−116,080)		(−818)	(368)		(8)	(−759)		(−8)	(−72,029)		(−187)	(−141,900)		(−50)	(59)		(0)	(−1,055)	
中脚	0－6	0	(131,130)	(157.9)	(830)	(18,658)	(45.9)	(406)	(1,335)	(112.0)	(12)	(−38,828)	(7,310)	(−74)	(1,346,700)	(88,550)	(418)	(680)	(162)	(11)	(−1,322)	
		6	(−132,600)		(−840)	(233)		(5)	(−1,854)		(−17)	(−268,830)		(−515)	(84,289)		(26)	(503)		(2)	(−1,381)	
	6－5	6	(129,660)		(821)	(−212)		(−5)	(1,239)		(11)	(−298,550)		(−572)	(−53,281)		(−20)	(−63)		(0)	(−1,413)	
		5	(−129,780)		(−822)	(212)		(5)	(−1,683)		(−15)	(−242,120)		(−464)	(−14,983)		(−5)	(63)		(0)	(−1,291)	
	5－4	5	(128,030)		(811)	(−194)		(−4)	(1,167)		(10)	(−319,570)		(−612)	(34,751)		(11)	(−136)		(−1)	(−1,434)	
		4	(−128,150)		(−812)	(194)		(4)	(−1,621)		(−14)	(−207,280)		(−397)	(−108,150)		(−34)	(135)		(1)	(−1,238)	
下脚	0－9	0	(137,990)	(171.0)	(807)	(19,575)	(51.0)	(384)	(1,194)	(120.0)	(10)	(−24,945)	(9,004)	(−42)	(1,427,400)	(95,300)	(312)	(249)	(177)	(1)	(−1,161)	
		9	(−139,660)		(−817)	(252)		(5)	(−1,846)		(−15)	(−223,220)		(−372)	(55,131)		(16)	(560)		(2)	(−1,205)	
	9－8	9	(146,370)		(856)	(−201)		(−4)	(640)		(5)	(−196,490)		(−327)	(−30,583)		(−9)	(−61)		(−1)	(−1,192)	
		8	(−146,610)		(−857)	(201)		(4)	(−1,075)		(−9)	(−120,870)		(−201)	(−43,582)		(−13)	(61)		(1)	(−1,071)	
	8－7	8	(150,500)		(880)	(−274)		(−5)	(1,181)		(10)	(−300,370)		(−500)	(69,541)		(20)	(−157)		(1)	(−1,400)	
		7	(−150,750)		(−882)	(274)		(5)	(−1,626)		(−14)	(−230,190)		(−383)	(−173,270)		(−50)	(157)		(−1)	(−1,315)	

附表 1−3　A ゲート脚柱の断面力と応力　A2P（A2R）

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
上脚	0−3	0	114,720	141.9	808	16,340	45.9	356	632	96.0	7	69,882	4,610	182	1,146,900	77,350	408	1,680	140	24	−1,398	
			(114,910)		(810)	(16,366)		(357)	(650)		(7)	(69,709)		(181)	(1,148,600)		(408)	(1,680)		(24)	(−1,399)	
		3	−115,850		−816	233		5	−1,117		−12	−89,982		−234	109,020		39	350		5	−1,089	
			(−116,040)		(−818)	(235)		(5)	(−1,135)		(−12)	(−98,032)		(−255)	(108,710)		(39)	(−350)		(5)	(−1,112)	
	3−2	3	116,070		818	−307		−7	−356		−4	89,079		232	−108,050		−38	−218		−3	−1,088	
			(116,050)		(818)	(−306)		(−7)	(−336)		(−4)	(82,343)		(214)	(−107,550)		(−38)	(−300)		(−4)	(−1,070)	
		2	−116,050		−818	307		7	−54		−1	−33,313		−87	−5,523		−2	218		3	−907	
			(−116,030)		(−818)	(306)		(7)	(−738)		(−8)	(−33,798)		(−88)	(−5,569)		(−2)	(300)		(4)	(−908)	
	2−1	2	116,130		818	−331		−7	−458		−5	33,286		87	5,553		2	−25		0	−907	
			(116,120)		(818)	(−330)		(−7)	(−462)		(−5)	(34,303)		(89)	(5,603)		(2)	(−25)		(0)	(−909)	
		1	−116,110		−818	331		7	39		0	60,704		158	−130,490		−46	25		0	−1,022	
			(−116,090)		(−818)	(330)		(7)	(43)		(0)	(61,007)		(159)	(−130,320)		(−46)	(25)		(0)	(−1,023)	
中脚	0−6	0	140,260	157.9	888	20,097	45.9	438	1,019	112.0	9	−27,596	7,310	−53	1,469,100	88,550	456	2,320	162	29	−1,397	
			(140,090)		(887)	(20,074)		(437)	(1,058)		(9)	(−29,361)		(−56)	(1,466,200)		(455)	(2,320)		(29)	(−1,398)	
		6	−141,810		−898	122		3	−1,532		−14	−134,780		−258	120,450		37	560		7	−1,193	
			(−141,660)		(−897)	(122)		(3)	(−1,571)		(−14)	(−150,660)		(−289)	(121,430)		(38)	(480)		(6)	(−1,224)	
	6−5	6	131,550		833	−305		−7	−557		−5	133,450		256	−120,290		−37	−38		0	−1,126	
			(131,570)		(833)	(−304)		(−7)	(−513)		(−5)	(119,130)		(228)	(−120,470)		(−37)	(−121)		(−2)	(−1,098)	
		5	−131,660		−834	305		7	113		1	−9,582		−18	7,268		2	38		0	−854	
			(−131,690)		(−834)	(304)		(7)	(69)		(1)	(−114,960)		(−220)	(7,824)		(2)	(121)		(−2)	(−1,056)	
	5−4	5	126,590		802	−358		−8	−237		−2	9,552		18	−7,192		−2	−61		−1	−822	
			(126,610)		(802)	(−361)		(−8)	(−243)		(−2)	(117,650)		(−225)	(−7,786)		(−2)	(−56)		(−1)	(−1,029)	
		4	−126,710		−802	358		8	−217		−2	−5,772		−11	−127,980		−40	61		1	−853	
			(−126,730)		(803)	(361)		(8)	(−211)		(−2)	(−5,751)		(11)	(128,570)		(−40)	(56)		(1)	(−854)	
下脚	0−9	0	134,320	171.0	785	19,006	51.0	373	1,092	120.0	9	−42,285	9,004	−70	1,347,400	95,300	389	2,670	170	30	−1,244	
			(134,280)		(785)	(18,999)		(373)	(1,105)		(9)	(−40,348)		(−67)	(134,510)		(39)	(2,670)		(30)	(−891)	
		9	−135,950		−795	298		6	−1,745		−15	−157,060		−262	69,114		20	534		6	−1,077	
			(−135,900)		(−795)	(299)		(6)	(−1,758)		(−15)	(−165,030)		(−275)	(71,007)		(21)	(534)		(6)	(−1,091)	
	9−8	9	135,680		793	−281		−6	−618		−5	155,630		259	−70,165		−20	−487		−5	−1,072	
			(135,680)		(795)	(−284)		(−6)	(−605)		(−5)	(150,550)		(251)	(−71,235)		(−21)	(−553)		(−5)	(−1,067)	
		8	−135,910		−795	281		6	183		2	−7,462		−12	−33,683		−10	487		5	−817	
			(−136,120)		(−796)	(284)		(6)	(171)		(1)	(−6,987)		(−12)	(−33,821)		(−10)	(553)		(5)	(−818)	
	8−7	8	146,850		859	−310		−6	−261		−2	7,420		12	33,818		10	−253		−3	−881	
			(146,820)		(859)	(−312)		(−6)	(−259)		(−2)	(6,930)		(12)	(33,803)		(10)	(−248)		(−3)	(−881)	
		7	−147,090		−860	310		6	−183		−2	7,407		12	−151,100		−44	253		3	−916	
			(−147,060)		(−860)	(312)		(6)	(−185)		(−2)	(6,971)		(−24)	(−151,860)		(−44)	(248)		(3)	(−928)	

附表1－4　Aゲート脚柱の断面力と応力　A3P（A3R）

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
上脚	0－3	0	115,700 (115,860)	141.9	815 (816)	−66 (−69)	45.9	−1 (−2)	494 (510)	96	5 (5)	100,070 (99,578)	4,610	260 (259)	−51,950 (−52,540)	77,350	−18 (−19)	610 (418)	140	9 (6)	−1,093 (−1,094)	
		3	−115,680 (−115,830)		−815 (−816)	66 (69)		1 (2)	−995 (−1,011)		−10 (−11)	−67,625 (−74,347)		−176 (−194)	24,721 (24,079)		9 (9)	610 (418)		9 (6)	−1,000 (−1,019)	
	3－2	3	115,880 (115,860)		817 (816)	−103 (−101)		−2 (−2)	292 (−276)		−3 (−3)	67,545 (62,140)		176 (32)	−24,628 (−23,878)		−9 (−8)	−12 (−193)		0 (−3)	−1,002 −856	
		2	115,850 (−115,840)		−816 (−816)	103 (101)		2 (2)	−118 (−133)		−1 (−1)	−35,489 (−35,822)		−92 (−93)	−13,260 (−13,314)		−5 (−5)	12 (193)		0 (3)	−913 (−914)	
	2－1	2	115,940 (115,940)		817 (817)	−118 (−117)		−3 (−3)	−468 (−470)		−5 (−5)	35,493 (36,306)		93 (95)	13,256 (13,324)		5 (5)	−37 (−79)		−1 (−1)	−915 (−917)	
		1	115,920 (−115,910)		−817 (−817)	118 (117)		3 (3)	49 (52)		1 (1)	62,049 (62,266)		162 (162)	−57,948 (−57,628)		−21 (−20)	37 (79)		1 (1)	−1,000 (−1,999)	
中脚	0－6	0	140,770 (140,660)	157.9	892 (891)	127 (129)	45.9	3 (3)	913 (946)	112	8 (8)	−31,868 (−33,884)	7,310	−61 (−65)	49,429 (49,067)	88,550	15 (15)	135 (83)	162	2 (1)	−968 (−971)	
		6	−140,910 (−140,800)		−892 (−892)	−127 (−129)		−3 (−3)	−1,455 (−1,489)		−13 (−13)	−106,330 (−119,540)		−204 (−229)	−5,984 (−4,775)		−2 (−1)	135 (83)		2 (1)	−1,098 (−1,122)	
	6－5	6	131,510 (131,540)		833 (832)	−10 (−11)		0 (0)	−477 (−439)		−4 (−4)	106,250 (94,385)		203 (181)	6,005 (5,401)		2 (2)	11 (−58)		0 (−1)	−1,038 (−1,015)	
		5	−131,630 (−131,650)		−834 (−834)	10 (11)		0 (0)	33 (−4)		0 (0)	−12,030 (−14,062)		−23 (−27)	−9,881 (−9,440)		−3 (−3)	−11 (58)		0 (1)	−860 (−864)	
	5－4	5	126,590 (126,610)		802 (802)	−59 (−62)		−1 (−1)	−252 (−256)		−2 (−2)	12,024 (13,442)		23 (26)	9,916 (9,434)		3 (3)	−77 (−68)		−1 (−1)	−828 (−831)	
		4	−126,710 (−120,730)		−802 (−803)	59 (62)		1 (1)	−201 (−197)		−2 (−2)	−2,251 (−2,252)		4 (−4)	32,342 (−33,009)		10 (−10)	77 (68)		1 (1)	−816 (−817)	
下脚	0－9	0	136,370 (136,330)	171.0	797 (797)	157 (155)	51.0	3 (3)	1,150 (1,160)	120	10 (10)	−80,753 (−78,475)	9,004	−135 (−131)	97,686 (95,181)	95,300	28 (27)	97 (53)	177	1 (1)	−960 (−955)	
		9	−136,660 (−136,620)		−799 (−799)	−157 (−155)		−3 (−3)	−1,682 (−1,691)		−14 (−14)	−123,560 (−130,190)		−206 (−217)	−58,913 (−57,211)		−17 (−17)	97 (53)		1 (1)	−1,022 (−1,033)	
	9－8	9	136,380 (136,540)		798 (798)	22 (19)		0 (0)	−523 (−514)		−4 (−4)	123,550 (119,430)		206 (199)	58,902 (57,826)		17 (17)	−26 (−78)		0 (−1)	−1,021 (−934)	
		8	−136,620 (−136,780)		−799 (−800)	−22 (−19)		0 (0)	88 (79)		1 (1)	−10,704 (−9,873)		−18 (−16)	−50,777 (−50,815)		−15 (−15)	26 (78)		0 (1)	−832 (−831)	
	8－7	8	146,620 (146,590)		857 (857)	−7 (−10)		0 (0)	−285 (−285)		−2 (−2)	10,718 (10,893)		18 (18)	51,041 (50,954)		15 (15)	−196 (−194)		−2 (−2)	−890 (−890)	
		7	−146,860 (−146,830)		−859 (−859)	7 (10)		0 (0)	−159 (−158)		−1 (−1)	13,084 (13,142)		22 (22)	−53,854 (−54,652)		−16 (−16)	196 (194)		2 (2)	−897 (−897)	

附表1－5　Aゲート脚柱の断面力と応力　A4P（A4R）

	部材	略点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
上脚	0－3	0	116,020	141.9	818	−75	45.9	−2	335	960	3	101,120	4,610	263	−58,793	77,350	−21	862	140	12	−1,102	
			(116,340)		(820)	(−78)		(−2)	(362)		(4)	(100,530)		(262)	(−59,289)		(−21)	(536)		(6)	(−1,103)	
		3	−115,990		−817	75		2	−837		−9	3,118		8	27,485		10	862		12	−835	
			(−116,310)		(−820)	(78)		(2)	(−863)		(−9)	(−8,281)		(−22)	(26,751)		(10)	(535)		(6)	(−852)	
	3－2	3	116,140		818	−107		−2	−124		−1	−3,212		−8	−27,376		−10	−167		−2	−836	
			(116,160)		(819)	(−105)		(−2)	(−88)		(−1)	(−12,211)		(−32)	(−26,434)		(−9)	(−301)		(−4)	(−860)	
		2	−116,120		−818	107		2	−286		−3	−26,654		−69	−12,061		−4	167		2	−891	
			(−116,140)		(−818)	(105)		(2)	(−321)		(−3)	(−30,895)		(−80)	(−12,267)		(−4)	(301)		(4)	(−902)	
	2－1	2	116,210		819	−124		−3	−304		−3	26,626		69	12,092		4	35		1	−892	
			(116,180)		(819)	(−121)		(−3)	(−296)		(−3)	(24,044)		(63)	(12,375)		(4)	(−201)		(−3)	(−886)	
		1	−116,190		−819	124		3	−114		−1	9,141		19	−58,753		−21	−35		−1	−859	
			(−116,160)		(−819)	(121)		(3)	(−122)		(−1)	(8,861)		(23)	(−58,166)		(−21)	(201)		(3)	(−843)	
中脚	0－6	0	137,170	157.9	869	128	45.9	3	640	1120	6	−26,968	7,310	−52	74,198	88,550	23	227	162	3	−944	
			(136,900)		(867)	(128)		(3)	(596)		(6)	(−29,957)		(−57)	(72,298)		(22)	(121)		(−2)	(−946)	
		6	−137,310		−870	−128		−3	−1,183		−11	11,903		23	−36,205		−9	227		3	−902	
			(−137,040)		(−868)	(−128)		(−3)	(−1,239)		(−11)	(−10,484)		(−20)	(−28,497)		(−9)	(121)		(2)	(−897)	
	6－5	6	137,740		870	32		1	−134		−1	−11,932		−23	30,055		9	−38		0	−904	
			(137,320)		(872)	(34)		(1)	(−51)		(0)	(−32,267)		(−62)	(29,839)		(9)	(−91)		(−1)	(−941)	
		5	−137,860		−873	−32		−1	−310		−3	−20,515		−39	−18,247		−6	38		0	−918	
			(−137,440)		(−870)	(−34)		(−1)	(−392)		(−4)	(−30,808)		(−59)	(−17,207)		(−5)	(91)		(1)	(−934)	
	5－4	5	131,170		831	−35		−1	−263		−2	20,513		39	17,910		6	−119		−1	−876	
			(131,170)		(831)	(−39)		(−1)	(−254)		(−2)	(16,508)		(32)	(17,630)		(5)	(−189)		(−2)	(−868)	
		4	−131,280		−831	35		1	−190		−2	−6,818		−13	−31,261		−10	119		1	−854	
			(−131,290)		(−831)	(39)		(1)	(−199)		(−2)	(−6,239)		(−12)	(−32,288)		(−10)	(189)		(2)	(−853)	
下脚	0－9	0	139,760	171.0	817	214	51.0	4	829	1200	7	−80,347	9,004	−134	170,750	95,300	49	190	177	2	−1,000	
			(139,720)		(817)	(210)		(4)	(854)		(7)	(−77,273)		(−129)	(165,720)		(48)	(102)		(1)	(−994)	
		9	−140,050		−819	−214		−4	−1,361		−11	21,242		35	−106,200		−31	190		2	−885	
			(−140,010)		(−819)	(−210)		(−4)	(−1,386)		(−12)	(6,881)		(11)	(−102,710)		(−30)	(120)		(1)	(−860)	
	9－8	9	146,820		859	120		2	−122		−1	−21,277		−35	105,970		31	−59		−1	−925	
			(146,760)		(858)	(117)		(2)	(−83)		(−1)	(−30,840)		(−51)	(104,100)		(30)	(−90)		(−1)	(−939)	
		8	−147,060		−860	−120		−2	−312		−3	−13,755		−23	−61,638		−18	59		1	−901	
			(−146,990)		(−860)	(−117)		(−2)	(−351)		(−3)	(−18,645)		(−31)	(−61,030)		(−18)	(90)		(1)	(−909)	
	8－7	8	151,740		888	81		2	−68		−1	13,748		23	61,477		18	−84		−1	−929	
			(151,740)		(887)	(76)		(1)	(−49)		(0)	(7,983)		(13)	(61,557)		(18)	(−158)		(−2)	(−918)	
		7	−152,030		−889	−81		−2	−376		−3	−71,956		−120	−30,870		−9	84		1	−1,018	
			(−151,990)		(−889)	(−76)		(−1)	(−394)		(−3)	(−73,068)		(−122)	(−32,728)		(−9)	(153)		(2)	(−1,020)	

附表2－1　Aゲート中間支持材の断面力と応力　AOP（AOR）

部材		節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
中間支持材	3－6	3	362	44.3	8	−87	12.3	−7	−2	32.0	0	0	655	0	−8,510	2,924	−25	−2	10	0	−33	
			(222)		(5)	(−471)		(−15)	(251)		(20)	(−179,920)		(−2,335)	(−33,316)		(−114)	(4)		(0)	(−2,454)	
		6	−393		−9	87		7	−2		0	0		0	−3,543		−10	2		0	−19	
			(−252)		(−6)	(471)		(15)	(−252)		(−20)	(−168,660)		(−2,189)	(−31,994)		(−109)	(−4)		(0)	(−2,304)	
	2－5	2	−224		−5	−12		−1	−3		0	0		0	−494		−1	−2		0	+500	引張応力
			(269)		(6)	(−162)		(−5)	(972)		79	(−123,110)		(−1,598)	(−18,152)		(−62)	(2)		(0)	(−1,666)	
		5	(169)		4	12		1	−3		0	0		0	−2,598		−8	2		0	+12	〃
			(−324)		(−7)	(162)		(5)	(−977)		(−79)	(−122,270)		(−1,587)	(−22,749)		(−78)	(−2)		(0)	(−1,572)	
	6－9	6	87		2	−194		−16	−5		0	0		0	−8,092		−24	−3		0	−26	
			(−256)		(−6)	(−707)		(−22)	(4,019)		(326)	(−218,840)		(−2,840)	(−34,334)		(−117)	(0)		(0)	(+2,963)	
		9	−109		−2	194		16	−5		0	0		0	−13,513		−39	3		0	−41	
			(234)		(5)	(707)		(22)	(−4,028)		(−327)	(−229,830)		(−2,983)	(−44,472)		(−152)	(0)		(0)	(+3,140)	
	5－8	5	900		20	9		1	−8		0	0		0	2,357		7	−5		0	−27	
			(379)		(9)	(−213)		(−7)	(1,610)		(130)	(−151,880)		(−2,161)	(−18,815)		(−64)	(0)		(0)	(−2,234)	
		8	−942		−21	−9		−1	−8		0	0		0	−608		−2	5		0	−23	
			(−420)		(−9)	(213)		(7)	(−1,626)		(−132)	(−155,690)		(−2,150)	(−24,241)		(−83)	(0)		(0)	(−2,242)	

附表2－2　Aゲート中間支持材の断面力と応力　（A1R）

部材		節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
中間支持材	3－6	3	(223)	(132.32)	(2)	(−655)	(17.92)	(−37)	(3,756)	(114.4)	(34)	(−293,260)	(4,617)	(−699)	(−49,040)	(7,337)	(−60)	(147)	(269)	(0)	(−761)	
		6	(−367)		(−3)	(655)		(37)	(−3,770)		(−33)	(−227,990)		(−543)	(−41,632)		(−51)	(−147)		(0)	(−597)	
	2－5	2	(267)	(157.36)	(2)	(−308)	(17.36)	(−18)	(1,815)	(140.0)	(13)	(−250,170)	(7,295)	(−429)	(−36,500)	(8,623)	(−38)	(140)	(377)	(0)	(−469)	
		5	(−577)		(−4)	(308)		(18)	(−1,847)		(−13)	(−210,800)		(−361)	(−41,001)		(−43)	(−140)		(0)	(−408)	
	6－9	6	(−473)	(132.32)	(−4)	(−1,066)	(17.92)	(−59)	(6,681)	(114.4)	(58)	(−332,740)	(4,617)	(−793)	(−48,801)	(7,337)	(−60)	(59)	(269)	(0)	(+857)	引張応力
		9	(365)		(3)	(1,066)		(59)	(−6,724)		(−59)	(−414,670)		(−988)	(−70,029)		(−86)	(−59)		(0)	(+1,077)	〃
	5－8	5	(372)	(157.36)	(2)	(−497)	(17.36)	(−29)	(3,723)	(140.0)	(27)	(−345,490)	(7,295)	(−592)	(−39,968)	(8,623)	(−42)	(65)	(377)	(0)	(−636)	
		8	(−605)		(−4)	(497)		(29)	(−3,816)		(−27)	(−417,660)		(−716)	(−60,622)		(−63)	(−65)		(0)	(−783)	

附表2－3　Aゲート中間支持材の断面力と応力　$A2_P$,（$A2_R$）

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
中間支持材	3－6	3	1,492	122	122	−80	6.1	−13	−2	6.1	0	0	93	0	−6,333	93	−306	2	2	1	−428	
			(1,458)		(119)	(−107)		(−18)	(206)		(34)	(−14,658)		(−709)	(−8284)		(−401)	(3)		(1)	(−1,229)	
		6	−1,522		−125	80		13	−2		0	0		0	−4,686		−227	−2		−1	−352	
			(−1,488)		(−122)	(−107)		(−18)	(−209)		(−34)	(−14,103)		(−682)	((−6,497)		(−314)	(−3)		(−1)	(−1,118)	
	2－5	2	510		42	−2		0	−3		0	0		0	−193		−9	0		0	−51	
			(534)		(44)	(−2)		(0)	(−5)		(−1)	(539)		(26)	(−198)		(−10)	(0)		(0)	(−80)	
		5	−565		−46	2		0	−3		0	0		0	−353		−17	0		0	−63	
			(−589)		(−48)	(2)		(0)	(0)		(0)	(42)		(2)	(−340)		(−16)	(0)		(0)	(−66)	
	6－9	6	−2,395		−196	−128		−21	−5		−1	0		0	−4,678		−226	3		1	+422	引張応力
			(−2,366)		(−194)	(−159)		(−26)	(236)		(39)	(−13,848)		(−670)	(−6,556)		(−317)	(3)		(1)	(+1,181)	
		9	2,372		194	128		21	−5		−1	0		0	−9,544		−462	−3		−1	+646	〃
			(2,343)		(192)	(159)		(26)	(−245)		(−40)	(−12,962)		(−627)	(−11,228)		(−543)	(−3)		(−1)	(+1,342)	
	5－8	5	−3,391		−277	0		0	−8		−1	0		0	240		12	1		0	+289	〃
			(−3,327)		(−272)	(0)		(0)	(−16)		(−3)	(883)		(43)	(300)		(15)	(1)		(0)	(+330)	
		8	3,349		274	0		0	−8		−1	0		0	−279		−14	−1		0	+288	〃
			(3,286)		(269)	(0)		(0)	(1)		(0)	(661)		(32)	(−211)		(−10)	(−1)		(0)	(+311)	
	6－8	6	11,801		966	−1		0	0		0	0		0	−276		−13	1		0	−979	
			(11,558)		(946)	(0)		(0)	(−7)		(−1)	(2,039)		(99)	(−54)		(−3)	(0)		(0)	(−1,048)	
		8	−11,801		−966	1		0	0		0	0		0	−173		−8	−1		0	−974	
			(−11,558)		(−946)	(0)		(0)	(7)		(1)	(680)		(33)	(−67)		(−3)	(0)		(0)	(−982)	
	5－7	5	6,267		513	−2		0	0		0	0		0	0		0	−1		0	−513	
			(6,288)		(515)	(−2)		(0)	(−3)		(−1)	(526)		(30)	(−228)		(−11)	(−1)		(0)	(−534)	
		7	−1,267		−513	2		0	0		0	0		0	0		0	1		0	−513	
			(−6,288)		(−515)	(2)		(0)	(3)		(1)	(730)		(35)	(−563)		(−27)	(1)		(0)	(−577)	

附表2－4　Aゲート中間支持材の断面力と応力　A3P，(A3R)

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
中間支持材	3－6	3	1,301	122	106	−10	6.1	0	−1	6.1	0	0	93	0	−606	93	−29	0	2	0	−135	
			(1,275)		(104)	(−28)		(−5)	(168)		(27)	(−12,067)		(−584)	(−1,866)		(−90)	(1)		(0)	(−778)	
		6	−1,314		−108	10		0	−1		0	0		0	−781		−38	0		0	−146	
			(−1,288)		(−105)	(28)		(5)	(−170)		(−28)	(−11,353)		(−549)	(−2,059)		(−100)	(−1)		(0)	(−754)	
	2－5	2	584		48	−1		0	−1		0	0		0	29		1	0		0	−49	
			(603)		(49)	(−1)		(0)	(−4)		(1)	(495)		(24)	(−45)		(−2)	(0)		(0)	(−75)	
		5	−606		50	1		0	−1		0	0		0	−199		−10	0		0	−60	
			(−625)		(−51)	(1)		(0)	(1)		(0)	(168)		(8)	(−189)		(−9)	(0)		(0)	(−68)	
	6－9	6	−2252		−184	4		0	−2		0	0		0	514		25	0		0	+209	引張応力
			(−2229)		(−182)	(−21)		(−3)	(193)		(32)	(−11,074)		(−536)	(−949)		(−46)	(1)		(0)	(+764)	
		9	2243		184	−4		0	−2		0	0		0	−76		−4	0		0	+188	〃
			(2219)		(182)	(21)		(3)	(−197)		(−32)	(−10,688)		(−517)	(−1,425)		(−69)	(−1)		(0)	(+768)	
	5－8	5	−3227		−264	2		0	−3		0	0		0	208		10	1		0	+274	〃
			(−3,177)		(−260)	(2)		(0)	(−11)		(−2)	(710)		(34)	(306)		(15)	(1)		(0)	(+309)	
		8	3,210		263	−2		0	−3		0	0		0	110		5	−1		0	+268	〃
			(3,160)		(259)	(−2)		(0)	(4)		(−1)	(754)		(36)	(174)		(8)	(−1)		(0)	(+303)	
	6－8	6	10,794		883	−1		0	−13		0	0		0	−237		−11	1		0	−894	
			(10,599)		(867)	(−1)		(0)	(−18)		(−3)	(2,536)		(123)	(−68)		(−3)	(0)		(0)	(−993)	
		8	−10,819		−885	1		0	−13		0	0		0	−262		−13	−1		0	−898	
			(−10,624)		(869)	(1)		(0)	(−7)		(−1)	(−250)		(−12)	(−178)		(−9)	(0)		(0)	(−890)	
	5－7	5	6,233		510	−1		(0)	−12		0	0		0	−121		−6	−1		0	−516	
			(6,255)		(512)	(−1)		(0)	(−15)		(−2)	(1,519)		(74)	(−151)		(−7)	(−1)		(0)	(−593)	
		7	−6,266		−513	1		(0)	−12		0	0		0	−436		−21	1		0	−534	
			(−6,288)		(−515)	(1)		(0)	(−8)		(−1)	(−87)		(−4)	(−452)		(−22)	(1)		(0)	(−541)	

附表2－5　Aゲート中間支持材の断面力と応力　A4P,（A4R）

部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
中間支持材 3－6	3	971	1222	79	−10	6.11	−2	−1	6.11	0	0		0	−710		−34	0		0	−113	
		(917)	(1222)	(75)	(−44)	(6.1)	(−7)	(288)	(6.1)	(47)	(−20276)	(93)	(−981)	(−2997)	(93)	(−145)	(1)	(3)	(0)	(−1201)	
	6	−984		−81	10		2	−1		0	0		0	−626		−30	0		0	−111	
		(−929)		(−76)	(44)		(7)	(−289)		(−47)	(−19652)		(−951)	(−3126)		(−151)	(−1)		(0)	(−1178)	
2－5	2	588		48	−2		0	−1		0	0		0	−204		−10	0		0	−58	
		(608)		(50)	(−8)		(−1)	(53)		(9)	(−6776)		(−328)	(−1021)		(−49)	(0.7)		(0)	(−427)	
	5	−610		−50	2		0	−1		0	0		0	−208		−10	0		0	−60	
		(−630)		(−52)	(8)		(1)	(−55)		(−9)	(−6864)		(−332)	(−1070)		(−52)	(−0.7)		(0)	(−436)	
6－9	6	2267		186	2		0	−2		0	0		0	440		21	0		0	−207	
		(2090)		(171)	(−51)		(−8)	(405)		(66)	(−22736)		(−1100)	(−2647)		(−128)	(1)		(0)	(−1399)	
	9	−2276		−186	−2		0	−2		0	0		0	−3073		−13	0		0	−199	
		(−2099)		(−172)	(51)		(8)	(−409)		(−67)	(−22641)		(−1096)	(−262)		(−149)	(−1)		(0)	(−1417)	
5－8	5	3334		273	1		0	−3		0	1		0	204		10	1		0	−283	
		(3276)		(268)	(−10)		(−2)	(78)		(13)	(−8178)		(−396)	(−877)		(−42)	(0.9)		(0)	(−706)	
	8	−3351		−274	−1		0	−3		−0	−1		0	−92		−4	−1		0	−278	
		(−3293)		(−269)	(10)		(2)	(−85)		(−14)	(−8392)		(−406)	(−1130)		(−55)	(−0.9)		(0)	(−730)	
5－9	5	−7499		−614	1		0	−18		−3	−1		0	291		14	−1		0	+628	引張
		(−7023)		(−575)	(−0.1)		(0)	(−17)		(−3)	(857)		(41)	(49)		(2)	(−1)		(0)	(+618)	応力
	9	7499		575	−1		0	−18		−3	1		0	226		11	1		0	+586	〃
		(7023)		(614)	(0.1)		(0)	(−19)		(−3)	(−1151)		(−56)	(−90)		(−4)	(1)		(0)	(+674)	
4－8	4	−5675		−464	1		0	−20		−3	−2		0	415		20	−2		−1	+484	〃
		(−5608)		(−459)	(0.7)		(0)	(−16)		(−3)	(686)		(33)	(311)		(15)	(−2)		(−1)	(+507)	
	8	5667		464	−1		0	−20		−3	2		0	197		10	2		1	+474	〃
		(5599)		(458)	(−0.7)		(0)	(−23)		(−4)	(−2212)		(−107)	(−6)		(0)	(2)		(1)	(+565)	

附表3－1 Aゲート縦トラスEの断面力と応力 AO_F

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Pz せん断力	Pz Az	Pz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラス(E)	11-12	11	9,480	1222	776	1	6.11	0	−44	6.11	−7	3,660	93	177	−88	93	−4	−118		−42	−957	
		12	−9,501		−778	−1		0	43		7	5,242		254	288		14	118		42	−1,046	
	12-1	12	9,758		798	−7		−1	−25		−4	1,802		87	−588		−28	53		19	−913	
		1	−9,778		−800	7		1	25		4	3,263		158	−843		−41	−53		−19	−999	
	1-4	1	6,334		518	1		0	15		2	−3,585		−174	−84		−4	7		2	−696	
		4	−6,371		−521	−1		0	−19		−3	−2,598		−126	277		13	−7		−2	−660	
	4-7	4	−1,615		−132	4		1	14		2	−2,424		−117	550		27	63		22	−12	
		7	1,587		130	−4		−1	−25		−4	−3,233		−156	641		31	−63		−22	−57	
	7-19	7	9,550		782	−17		−3	−29		−5	3,467		168	−1,523		−74	−102		−36	−1,024	
		19	−9,565		−783	17		3	27		4	875		42	−1,060		51	102		36	−876	
	12-13	12	−108		−9	−8		−1	−234		−38	7,044		341	−270		−13	215		76	−345	
		13	104		9	8		1	227		37	11,465		555	−374		−18	−215		−75	−564	
	13-1	13	12,354		1,011	−13		−2	8		1	−2,792		135	−1,199		−58	−4		−1	−1,204	
		1	−12,371		−1,012	13		2	−16		−3	469		23	−1,273		62	4		1	−1,097	
	1-15	1	15,518		1,270	−4		−1	−35		−6	4,930		239	−377		−18	−158		−56	−1,527	
		15	−15,537		−1,271	4		1	26		4	−1,683		81	−421		−20	158		56	−1,372	
	15-4	15	−576		−47	−3		0	−12		−2	1,195		57	−337		−16	189		67	−27	
		4	559		46	3		0	2		0	−124		−6	−219		−11	−189		−67	+63	
	4-17	4	10,338		846	−13		−2	−36		−6	3,873		187	−1,388		−67	−77		−27	−1,100	
		17	−10,356		−847	13		2	31		5	2,301		111	−1,083		−52	77		27	−1,010	
	17-7	17	33		3	−4		−1	−17		−3	1,976		96	−342		−17	250		88	−116	
		7	−42		−3	4		1	1		0	−362		−18	−481		−23	250		−88	−44	

附表3－2　Aゲート縦トラスEの断面力と応力　A2P

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラスE	11–12	11	9,933	1222	813	11	6.11	2	−45	6.11	−7	3,730	93	180	−68	93	−3	−108		−38	−996	
		12	−9,954		−814	−11		−2	44		7	5,355		259	287		14	108		38	−1,087	
	12–1	12	10,224		837	−73		−12	−32		−5	2,260		109	−585		−28	73		26	−934	
		1	−10,245		−838	73		12	31		5	4,089		198	−901		−44	−73		−26	−1,080	
	1–4	1	4,737		388	0		0	11		2	−2,717		−131	−199		−10	6		2	−529	
		4	−4,773		−391	0		0	−15		−2	−1,952		−94	150		7	−6		−2	−492	
	4–7	4	−834		−68	56		9	1		0	−730		−35	642		31	45		16	+134	
		7	807		66	−56		−9	−12		−2	−1,243		−60	1,005		49	−45		−16	−43	
	7–19	7	7,683		629	−234		−38	−11		−2	1,653		80	−2,205		−107	11		4	−816	
		9	−7,683		−630	234		38	9		1	−79		−4	−1,432		−69	−11		−4	−703	
	12–13	12	−107		−9	−84		−14	−249		−41	7,615		368	−279		−13	210		74	−372	
		13	104		9	84		14	241		39	12,059		583	−394		−19	−210		−74	−593	
	13–1	13	13,417		1,098	−135		−22	2		0	−2,371		−115	−1,196		−58	4		1	−1,271	
		1	−13,434		−1,099	135		22	−10		−2	1,296		63	−1,357		−66	−4		−1	−1,228	
	1–15	1	13,941		1,141	−3		0	−31		−5	4,141		200	−763		−13	−170		−60	−1,354	
		15	−13,961		−1,142	3		0	21		3	1,470		71	−354		−17	170		60	−1,230	
	15–4	15	−125		−10	−3		0	−17		−3	1,734		84	−390		−19	173		61	−100	
		4	108		9	3		0	4		1	615		30	−336		−16	−173		−61	−37	
	4–17	4	8,030		657	−12		−2	−28		−5	2,821		136	−1,224		−59	−94		−33	−852	
		17	−8,047		−659	12		2	−24		−4	1,985		96	970		47	94		33	−802	
	17–7	17	3,504		287	0		0	−30		−5	2,632		127	−88		−4	313		111	−418	
		7	−3,514		−288	0		0	15		2	1,505		73	114		6	−313		−111	−367	

附表3−3　Aゲート縦トラスEの断面力と応力　A3p

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラス(E)	11−12	11	9,938	1222	813	1	6.11	0	−45	6.11	−7	3,731	93	181	−64	93	−3	−106		−37	−997	
		12	−9,958		−815	−1		0	44		7	5,857		259	290		14	106		37	−1,088	
	12−1	12	10,229		837	−7		−1	−32		−5	2,261		109	−590		−29	85		30	−975	
		1	−10,249		−839	7		1	31		5	4,094		198	−914		−44	−85		−30	−1,081	
	1−4	1	4,764		390	0		0	11		2	−2,706		−131	−196		−9	11		4	−530	
		4	−4,801		−393	0		0	−15		−2	−1,940		−94	165		8	−11		−4	−495	
	4−7	4	−806		−66	6		1	1		0	−748		−36	638		31	428		151	−1	
		7	779		64	−6		−1	−12		−2	−1,261		−61	1,003		49	−428		−151	−46	
	7−19	7	7691		629	−24		−4	−11		−2	1,657		80	−2,270		−110	−3		−1	−819	
		19	−7,706		−630	24		4	9		1	−83		−4	−1,470		−71	3		1	−705	
	12−13	12	−107		−9	−9		−1	−249		−41	7,618		369	−288		−14	208		73	−374	
		13	104		9	9		1	242		40	12,063		584	−395		−19	−208		−73	−594	
	13−1	13	13,419		1,098	−14		−2	2		0	−2,371		−115	−1,214		−59	162		57	−1,272	
		1	−13,436		−1,100	14		2	−10		−2	1,300		63	−1,397		−68	−162		−57	−1,231	
	1−15	1	13,900		1,137	−3		0	−31		−5	4,122		199	−283		−14	−178		−63	−1,350	
		15	−13,920		−1,139	3		0	21		3	1,457		70	−373		−18	178		63	−1,227	
	15−4	15	−104		−9	−3		0	−17		−3	1,724		83	−395		−19	189		67	−99	
		4	86		7	3		0	4		1	613		30	−357		−17	−189		−67	−40	
	4−17	4	8,059		659	−12		−2	−28		−5	2,018		95	−1,276		−62	−108		−38	−816	
		17	−8,077		−661	12		2	24		4	1,959		95	−998		−48	108		38	−804	
	17−7	17	3,448		282	0		0	−30		−5	2,620		127	−114		−6	324		114	−415	
		7	−3,457		−283	0		0	15		2	1,482		72	67		3	−324		−114	−358	

附表3－4　Aゲート縦トラスKの断面力と応力　AOP

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	Mr 曲げモーメント	Mr Iy	Mr 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラス(K)	11–12	11	4,864	6.11	796	0	3.055	0	−21	3.055	−7	1,590	47	76	0	47	0	0		0	−872	
		12	−4,874		−798				21		7	2,621		125							−923	
	12–1	12	4,984		816				−8		−3	311		15							−831	
		1	−4,994		−817				7		2	1,213		58							−875	
	1–4	1	2,502		407				5		2	−1,166		−56							−465	
		4	−2,521		−413				−7		−2	−888		−43							−465	
	4–7	4	1,194		195				1		0	−565		−27							−222	
		7	−1,207		−198				−7		−2	−552		−26							−224	
	7–19	7	3,143		514				−2		−1	497		24							−538	
		19	−3,151		−516				1		0	−227		−11							−527	
	12–13	12	−50		−8				−98		−32	2,932		140							−132	
		13	49		8				95		31	4,820		231							−223	
	13–1	13	4,622		756				8		3	−1,762		−84							−840	
		1	−4,630		−758				−12		−4	−84		−4							−762	
	1–15	1	4,362		714				−7		−2	1,074		51							−765	
		15	−4,372		−716				2		−1	−83		−4							−720	
	15–4	15	−1,550		−254				−1		0	27		1							+255	
		4	1,542		252				−6		−2	−532		−25							+277	
	4–17	4	3,476		569				−10		−3	1,111		53							−622	
		17	−3,484		−570				8		3	517		25							−595	
	17–7	17	605		99				−9		−3	587		28							−127	
		7	−610		−100				1		0	−281		13							−113	

附表3−5　Aゲート縦トラスKの断面力と応力　A2P

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラスK	11−12	11	4,676	6.11	765	0	3.055	0	−20	3.055	−7	1,540	47	74	0	47	0	0		0	−839	
		12	−4,686		−767				20		7	2,526		121							−888	
	12−1	12	4,792		784				−7		−2	299		14							−798	
		1	−4803		−785				7		2	1,162		56							−841	
	1−4	1	2,341		383				5		2	−1,139		−55							−438	
		4	−2,359		−384				−6		−2	−880		−42							−426	
	4−7	4	739		121				−1		0	−289		−14							−135	
		7	−753		−123				−5		−2	−338		−16							−139	
	7−19	7	2,936		481				−1		0	414		20							− 50	
		19	−2,944		−481				0		0	−265		−13							−494	
	12−13	12	−49		−8				−95		−31	2,826		135							−127	
		13	47		8				91		30	4,650		223							−215	
	13−1	13	4,447		728				7		2	−1,702		−81							−809	
		1	−4,455		−728				−11		−4	−93		−4							−732	
	1−15	1	4,330		709				−7		−2	1,084		52							−761	
		15	−4,340		−709				2		1	52		2							−711	
	15−4	15	−1,486		−243				−1		0	85		4							+247	
		4	1,477		242				−5		−2	−484		−23							+265	
	4−17	4	2,767		438				−10		−3	1,008		48							−486	
		17	−2,776		−439				8		2	612		29							−468	
	17−7	17	1,145		187				−10		−3	644		31							−218	
		7	−1,150		−188				2		1	437		21							−209	

附表3－6　Aゲート縦トラスKの断面力と応力　A3.P

	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラス（K）	11-12	11	4,671	6.11	764	0	3.055	0	−20	3.055	−7	1,538	47	74	0	47	0	0		0	−838	
		12	−4,582		−766				20		7	2,524		121							−887	
	12-1	12	4,788		784				−7		−2	296		14							−798	
		1	−4,798		−785				7		2	1,158		55							−840	
	1-4	1	2,328		381				5		2	−1,147		−55							−436	
		4	−2,346		−382				−6		−2	−890		−43							−425	
	4-7	4	721		118				−1		0	−281		−13							−131	
		7	−735		−120				−5		−2	−331		−16							−136	
	7-19	7	2,924		479				−1		0	412		20							−499	
		19	−2,931		−480				0		0	−266		−13							−493	
	12-13	12	−49		−8				−95		−31	2,821		135							−127	
		13	47		8				91		30	4,644		222							−214	
	13-1	13	4,437		726				8		3	−1,704		−82							−808	
		1	−4,444		−727				−12		−4	−96		−5							−732	
	1-15	1	4,351		714				−7		−2	1,090		52							−766	
		15	−4,361		−714				2		1	−49		−2							−716	
	15-4	15	−1,518		−248				−1		0	84		4							+252	
		4	1,510		247				−5		−2	−492		−24							+271	
	4-17	4	2,746		449				−10		−3	1,011		48							−497	
		17	−2,755		450				8		3	621		30							−480	
	17-7	17	1,166		191				−10		−3	645		31							−222	
		7	−1,171		−191				2		1	443		21							−212	

附表4 Bゲート脚柱および中間支持材の断面力と応力

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
脚柱	0−3	0	104,740	119.52	876	23	47.52	0	495	72	7	−13,371	5,400	−37	1,173	30,130	1	31	57	0	−914	
		3	−104,740	119.52	−876	−30	47.52	−1	−879	72	−12	−68,421	5,400	−190	9,803	30,130	7	31	57	0	−1,075	
	3−2	3	102,950	124.6	826	39	52.6	1	499	72	7	−115,230	5,400	−320	−5,362	64,236	−2	−13	52	0	−1,148	
		2	−102,910	124.6	−826	−43	52.6	−1	−750	72	−10	−47,020	5,400	−131	16,049	64,236	7	13	52	0	−964	
	2−1	2	101,950	139.14	733	13	67.14	0	658	72	9	−114,940	5,400	−319	−12,173	126,019	−3	1	53	0	−1,055	
		1	−101,900	139.14	−732	−18	67.14	0	−946	72	−13	−99,625	5,400	−276	16,419	126,019	5	−2	53	0	−1,013	
	0−6	0	97,936	119.52	819	14	47.52	0	412	72	6	9,629	5,400	27	115	30,130	0	31	57	0	−846	
		6	−98,059	119.52	−820	−2	47.52	0	−781	72	−11	−53,465	5,400	−148	3,065	30,130	2	31	57	0	−970	
	6−5	6	99,799	124.6	801	60	52.6	1	539	72	7	−116,070	5,400	−322	−7,059	64,236	−3	−14	52	0	−1,126	
		5	−99,878	124.6	−802	−53	52.6	−1	−782	72	−11	−56,012	5,400	−155	21,756	64,236	9	14	52	0	−966	
	5−4	5	100,820	139.14	725	6	67.14	0	477	72	7	−92,905	5,400	−258	−25,307	126,019	−7	−22	53	0	−990	
		4	−100,910	139.14	−725	3	67.14	0	−754	72	−10	−71,833	5,400	−199	25,679	126,019	7	22	53	0	−931	
中間支持材	3−6	3	−45	79.4	−1	−174	25.38	−7	1,757	54	33	−182,810	4,052	−677	−18,100	13,118	−21	2	22	0	−699	
		6	−79	79.4	−1	174	25.38	7	−1,766	54	−33	−168,760	4,052	−625	−16,560	13,118	−19	−2	22	0	−643	
	2−5	2	−178	79.4	−2	−94	25.38	−4	945	54	18	−161,220	4,052	−597	−15,974	13,118	−18	1	22	0	−617	
		5	−23	79.4	0	94	25.38	4	−960	54	−18	−148,230	4,052	−549	−14,672	13,118	−17	−1	22	0	−516	

附表5　Bゲート主桁間縦トラスⒷの断面力

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fr せん断力	Fr Ay	Fr せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
縦トラスⒷ	11-12	11	3,779	17.28	219	-11	27.0	-1	10	8.64	1	-1,584	94	-84	-1,515	219	-52	0			-355	
		12	-3,812	17.28	-221	11	8.64	-1	-16	8.64	-2	-1,599	94	-85	-1,141	219	-39	0			-445	
	12-14	12	4,036	17.28	234	33	8.64	4	120	8.64	14	-4,783	94	-255	-1,219	219	-42	-1			-531	
		14	-4,047	17.28	-237	-33	8.64	-4	-122	8.64	-14	-4,885	94	-260	-1,423	219	-49	1			-586	
	14-1	14	14,820	17.28	858	-9	8.64	-1	65	8.64	8	-3,473	94	-185	-683	219	-23	0			-1,066	
		1	-14,840	17.28	-859	9	8.64	1	-68	8.64	-9	-6,083	94	-324	-465	219	-16	0			-1,199	
	1-19	1	-1,174	23.52	-50	-2	16.71	0	89	6.81	13	-1,0630	240	-266	-282	260	-8	2			-224	
		19	1,134	23.52	48	2	16.71	0	-92	6.81	-16	-9,277	240	-232	-140	260	-4	-2			-184	
	19-4	19	-7,639	23.52	-325	18	16.71	1	-45	6.81	-7	5,458	240	136	159	260	5	-2			+466	
		4	7,597	23.52	323	-18	16.71	-1	42	6.81	6	4,568	240	114	267	260	8	2			+445	
	4-23	4	7,546	18.7	404	2	6.7	0	-47	12.0	-4	3,545	380	70	75	36	8	-1			-482	
		23	-7,568	18.7	-405	-2	6.7	0	39	12.0	3	3,211	380	63	-173	36	-18	1			-486	
	13-12	13	151	17.28	9	60	8.64	7	211	8.64	24	-10,827	170	-478	3,867	219	132	2			-619	
		12	-155	17.28	-9	-60	8.64	-7	-221	8.64	-26	-6,391	170	-282	886	219	30	-2			-321	
	13-14	13	7,613	17.28	441	10	8.64	1	41	8.64	5	-4,229	170	-187	1,094	219	37	2			-665	
		14	-7,629	17.28	-441	-10	8.64	-1	-49	8.64	-6	-1,408	170	-62	207	219	7	-2			-510	
	15-14	15	2,012	17.28	116	31	8.64	4	113	8.64	13	6,339	170	280	2,535	219	87	0			-483	
		14	-2,016	17.28	-117	-31	8.64	-4	-125	8.64	-14	-4,929	170	-217	407	219	14	0			-227	
	14-16	14	-8,022	17.28	-464	1	8.64	0	-53	8.64	-6	2,021	170	89	-627	219	-21	0			+574	
		16	8,016	17.28	464	-1	8.64	0	38	8.64	4	3,481	170	155	737	219	25	0			+644	
	16-1	16	11,523	17.28	667	11	8.64	1	36	8.64	4	-5,993	170	-246	1,142	219	39	1			-970	
		1	-11,537	17.28	-668	-11	8.64	-1	-49	8.64	-6	501	170	22	283	219	10	-1			-700	
	1-18	1	27,086	34.0	797	59	17.0	3	-16	17.0	-1	7,311	491	134	4,280	611	63	-11			-994	
		18	-27,117	34.0	-798	-59	17.0	-3	-16	17.0	-1	7,314	491	134	5,434	611	80	11			-1,012	
	18-19	18	-10,789	17.28	-624	18	8.64	2	-46	8.64	-5	5,056	170	223	2,336	219	80	2			+927	
		19	10,775	17.28	625	-18	8.64	-2	28	8.64	3	1,260	170	56	711	219	24	-2			+705	
	19-20	19	8,630	17.28	499	50	8.64	6	81	8.64	9	-4,491	170	-198	1,841	219	63	0			-760	
		20	-8,632	17.28	-499	-50	8.64	-6	-100	8.64	-12	-7,506	170	-331	4,817	219	165	0			-995	
	19-21	19	-972	17.28	-56	15	8.64	2	-44	8.64	-5	-1,932	170	85	724	219	25	-2			-54	
		21	947	17.28	55	-15	8.64	-2	28	8.64	3	5,130	170	226	2,135	219	73	2			-244	
	21-4	21	17,700	34.0	521	96	17.0	6	-23	17.0	-1	-5,051	491	-93	7,968	611	113	12			-727	
		4	-17,718	34.0	-521	-96	17.0	-6	-11	17.0	-1	5,922	491	109	6,382	611	94	-12			-724	

附表6−1　Cゲート脚柱および中間支持材の断面力と応力　CO_R

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Ix	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	許容応力
脚柱	0−3	0	26,973	43.90	614	250	13.30	19	116	30.6	4	674	737	11	43,596	4,618	80	15		1	−705	
		3	−26,985		−615	−250		−19	−221		−7	−13,266		−216	33,430		62	15		1	−893	
	3−2	3	26,459	47.61	556	236	17.01	14	135	30.6	4	−19,156	738	−391	−32,189	7,686	−36	0		0	−983	
		2	−26,465		−556	−236		−14	−192		−6	−5,223		−127	68,793		76	0		0	−759	
	2−1	2	26,110	50.11	521	−499	19.51	−26	182	30.6	6	−25,959	738	−603	−67,344	10,259	−56	8		1	−1,180	
		1	−26,117		−521	499		26	−238		−8	−4,177		−97	−4,259		−4	−8		−1	−622	
	0−6	0	22,816	43.9	520	308	13.30	23	110	30.6	4	2,659	737	43	58,923	4,618	108	12		1	−671	
		6	−22,865		−521	−308		−23	−203	30.6	−7	−11,571		−188	33,865		62	12		1	−771	
	6−5	6	23,410	47.61	492	298	17.01	18	146	30.6	5	−19,499	738	−398	−32,510	7,686	−36	−10		−1	−926	
		5	−23,437		−492	−298		−18	−197		−6	−7,085		−145	78,671		87	10		1	−724	
	5−4	5	23,803	50.11	475	−356	19.51	−18	192	30.6	6	−25,115	738	−584	−77,062	10,259	−64	−41		−3	−1,123	
		4	−23,829		−476	356		18	−242		8	−5,987		−139	25,934		21	40		3	−636	
中間支持材	3−6	3	−8	50.76	0	−69	23.76	−3	530	27	20	−32,180	508	−893	−4,136	6,413	−5	6		1	−898	
		6	−37		−1	69		3	−544		−20	−30,843		−856	−3,945		−5	−6		−1	−862	
	2−5	2	−53	54.27	−1	−53	27.27	−2	343	27	13	−31,638	508	−1,000	−4,805	6,413	−4	−2		0	−1,005	
		5	−20		0	53		2	−366		−14	−30,757		−972	−4,468		−4	2		0	−976	

附表6－2　Cゲート脚柱および中間支持材の断面力と応力　$C1_R$

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	許容応力
脚柱	0－3	0	27,051	43.9	616	247	13.30	19	126	30.6	4	664	737	11	42,657	4,618	79	13		3	−706	
		3	−27,062		−616	−247		−19	−231		−8	−16,332		−266	33,354		61	13		3	−943	
	3－2	3	26,775	47.61	563	230	17.01	14	35	30.6	1	−3,657	738	−75	−32,589	7,686	−36	5		1	−674	
		2	−26,781		−563	−230		−14	−92		−3	−6,251		−128	68,222		75	−5		−1	−766	
	2－1	2	26,500	50.11	529	−518	13.30	−27	−139	30.6	−5	1,983	738	46	−68,465	10,259	−57	−5		−1	−580	
		1	−26,506		−529	518		27	84		3	14,008		326	−5,786		−5	5		1	−860	
	0－6	0	22,735	43.9	518	309	17.01	23	121	30.6	4	2,547	737	41	57,296	4,618	105	11		2	−664	
		6	−22,784		−519	−309		−23	−241		−7	−14,795		−241	35,782		66	11		2	−826	
	6－5	6	23,377	47.61	491	290	19.51	17	35	30.6	1	−3,638	738	−74	−34,841	7,686	−39	−6		−1	−604	
		5	−23,404		−492	−290		−17	−85		−3	−5,691		−116	79,833		88	6		1	−696	
	5－4	5	23,896	50.11	477	−372	23.76	−19	−61	30.6	−2	−544	738	−13	−79,591	10,259	−66	−41		−8	−556	
		4	−23,923		−477	372		19	12		0.4	5,763		134	26,171		22	40		8	−633	
中間支持材（垂直支柱）	3－6	3	145	50.76	3	−40	23.76	−2	318	27	12	−19,838	508	−551	−2,552	6,413	−3	4		1	−557	
		6	−190		−4	40		2	−332		−12	−18,368		−510	−2,190		−3	−4		−1	−517	
	2－5	2	464	54.27	9	−7	27.27	−0.3	40	27	1	−4,655	508	−147	−805	8,630	−1	−2		−0.4	−157	
		5	−536		−10	7		0.3	−62		−2	−4,322		−137	−358		−0.3	2		0.4	−147	
中間支持材（斜材）	2－6	2	−396	12.22	−32	2	6.11	0.3	−13	6.11	−2	651	93	32	543	93	26	3		1	＋90	
		6	387		32	−2		−0.3	−6		−1	54		3	−182		−9	−3		−1	＋44	
	1－5	1	−796	12.22	−65	1	6.11	0.2	−3	6.11	−0.4	−1,039	93	−50	257	93	12	1		0.1	＋127	
		5	781		64	1		−0.2	−17		−3	−733		−35	−25		−1	−1		−0.1	＋100	

附表7－1 Dゲート脚柱および中間支持材の断面力と応力 DO_R

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大圧縮応力	摘要
脚柱	0－3	0	320,720	368.8	870	−425	118.8	−4	1,918	250	8	−134,020	52,115	−64	−363,510	338,418	−35	209	658	1	−969	
		3	−320,590	368.8	−870	425	118.8	4	−3,275	250	−13	225,300	52,115	108	186,230	338,418	18	209	658	1	−996	
	3－2	3	315,540	406.6	776	−557	156.6	−4	1,364	250	6	−845,450	52,126	−406	−167,760	602,048	−12	−242	698	−1	−1,194	
		2	−315,440	406.6	−776	557	156.6	4	−2,444	250	−10	198,070	52,126	95	−21,675	602,048	−2	242	698	1	−873	
	2－1	2	312,610	440.8	709	−472	190.8	−2	3,023	250	12	−722,860	52,135	−347	37,195	918,045	2	−696	735	−2	−1,058	
		1	−312,490	440.8	−709	472	190.8	2	−4,380	250	−18	−734,670	52,135	−352	−223,260	918,045	−13	696	735	2	−1,074	
	0－6	0	283,230	368.8	768	−346	118.8	−3	1,325	250	5	52,810	52,115	25	101,220	338,418	10	288	658	1	−803	
		6	−283,760	368.8	−769	346	118.8	3	−2,584	250	−10	339,610	52,115	163	−368,360	338,418	−36	288	658	1	−968	
	6－5	6	289,300	406.6	712	−423	156.6	−3	2,321	250	9	−936,880	52,126	−449	387,880	602,048	28	−253	698	−1	−1,189	
		5	−289,710	406.6	−712	423	156.6	3	−3,323	250	−13	−225,18	52,126	−11	−531,590	602,048	−38	253	698	1	−761	
	5－4	5	292,130	440.8	663	−401	190.8	−2	1,971	250	8	−475,370	52,135	−228	547,920	918,045	31	−751	735	−3	−922	
		4	−292,650	440.8	−664	401	190.8	2	−3,229	250	−13	−548,600	52,135	−263	−706,000	918,045	−40	752	735	3	−967	
中間支持材	3－6	3	770	174	4	−1,047	48.0	−22	5,292	126	42	−608,750	8,295	−1,284	−119,810	5,243	−498	148	158	2	−1,786	
		6	−1,078	174	−6	1,047	48.0	22	−5,340	126	−42	−586,350	8,295	−1,237	−115,570	5,243	−480	−148	158	−2	−1,723	
	2－5	2	−1,311	174	−8	−507	48.0	−11	2,549	126	20	−515,250	8,295	−1,087	−100,810	5,243	−419	109	158	1	+1,514	引張応力
		5	779	174	5	507	48.0	11	−2,632	126	−21	−488,820	8,295	−1,031	−95,690	5,243	−398	−109	158	−1	+1,434	〃

附表7－2　Dゲート脚柱および中間支持材の断面力と応力　D1R

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	捩れモーメント	Ix	せん断応力	最大圧縮応力	摘要
脚柱	0－3	0	324,420	368.8	879	−350.9	111.8	−3	2,794.3	250	11	−139,770	52,115	−67	−306,200	338,418	−30	116.9	658	0	−976	
		3	−324,300	368.8	−879	350.9	111.8	3	−4,151.9	250	−17	−181,010	52,115	−87	153,550	338,418	16	116.9	658	0	−982	
	3－2	3	322,210	406.6	792	−545.2	156.6	−3	47.1	250	1	−174,030	52,126	−83	−153,030	602,048	−11	−281.9	698	−1	−886	
		2	−322,110	406.6	−792	545.2	156.6	3	−1,127.5	250	−5	−25,564	52,126	−12	−32,345	602,048	−2	281.8	698	1	−806	
	2－1	2	316,620	440.8	718	−518.4	190.8	−3	−78.5	250	0	−132,530	53,135	−62	37,255	918,045	2	−428.9	735	−1	−782	
		1	−316,500	440.8	−718	518.4	190.8	3	−1,278.5	250	−5	−103,730	53,135	−49	−241,410	918,045	−14	428.9	735	1	−781	
	0－6	0	279,510	368.8	758	−414.3	118.8	−3	2,211.1	250	9	42,752	52,115	21	−85,041	338,418	−8	212.7	658	1	−787	
		6	−280,030	368.8	−759	414.3	118.8	3	−3,469.8	250	−14	−66,713	52,115	32	−21,401	338,418	−2	212.7	658	1	−793	
	6－5	6	287,650	406.6	708	−565.0	156.6	−4	993.7	250	4	−268,960	52,126	−129	225,670	602,048	16	−260.2	698	−1	−853	
		5	−288,070	406.6	−709	565.1	156.6	4	−1,995.4	250	−8	−239,170	52,126	−115	−417,780	602,048	−30	260.8	698	1	−854	
	5－4	5	293,560	440.8	656	−599.3	190.8	−3	−1,045.5	250	−4	101,350	52,135	48	422,530	918,045	24	−530.5	735	−2	−728	
		4	−294,090	440.8	−667	599.3	190.8	3	−212.8	250	−1	62,646	52,135	29	−658,540	918,045	−38	530.6	735	2	−734	
中間支持材	3－6	3	3,612.2	174	21	−586.8	48.0	−12	2,981.2	126	24	−348,560	8,295	−735	−68,354	5,243	−284	92.2	158	1	−1,040	
		6	−3,920.9	174	−23	586.8	48.0	12	−3,029.6	126	−24	−327,090	8,295	−690	−63,556	5,243	−264	−92.1	158	−1	−977	
	2－5	2	4,361.9	174	25	−143.95	48.0	−3	699.9	126	−6	−156,040	8,295	−329	−30,349	5,243	−126	62.3	158	1	−480	
		5	−4,894.2	174	−28	143.95	48.0	3	−783.3	126	−6	−131,380	8,295	−277	−25,440	5,243	−106	−62.3	158	−1	−411	
	2－6	2	−6,697.1	22.7	−295	−2.9	11.4	0	−29.2	11.3	−3	705.7	366	13	−323.2	366	6	−0.13	6	0	+314	引張応力
		6	6,651.6	22.7	293	2.9	11.4	0	−37.9	11.3	−3	−2,662	366	−47	−982.4	366	−17	0.13	6	0	+357	〃
	1－5	1	−8,507.2	22.7	−375	−0.4	11.4	0	−38.8	11.3	−3	2889.9	366	51	173.5	366	3	−0.61	6	0	+429	〃
		5	8,431.9	22.7	371	0.4	11.4	0	−42.5	11.3	−4	−4,018.7	366	−71	−412.9	366	−7	0.61	6	0	+449	〃

附表8－1　Dゲート主桁間縦トラスⒷの断面力と応力　DO_R

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラスⒷ	11-12	11	623	25.4	24.5	7	13.5	0.5	-6	11.88	-0.5	-161	129	-9.4	849	248	18.6	0.1		0	-53	
		12	-672		-26.5	-7		-0.5	-1		-0.1	855		49.7	902		19.8	-0.1		0	-96	
	12-15	12	9,058	25.4	356.6	-4	13.5	-0.3	21	11.88	1.8	-2,579	129	-149.9	-261	248	-5.7	-0.4		-0.1	-512	
		15	-9,101		-358.3	4		0.3	-27		-2.3	--2,542		-153.6	-586		-12.9	0.4		0.1	-525	
	15-1	15	7,335	25.4	288.8	24	13.5	1.8	4	11.88	0.3	-834	129	-48.5	1,673	248	36.7	3		0.4	-374	
		1	-7,380		-290.6	-24		-1.8	-15		-1.3	-1,332		-77.4	3,891		85.4	-3		-0.4	-453	
	1-18	1	-7,339	24.4	-300.8	81	12.6	6.4	48	11.84	4.1	-9,501	186	-459.7	14,571	334	285.3	2		0.2	-444	
		18	7,285		298.6	-81		-6.4	-59		-5	-6,012		-290.9	8,982		175.9	-2		-0.2	-168	
	18-4	18	-17,680	24.4	-724.6	9	12.6	0.7	-32	11.84	-2.7	5,402	186	261.4	3,368	334	65.9	-5		-0.4	+1,052	
		4	17,626		772.4	-9		-0.7	20		1.7	2,111		102.1	-861		-16.9	5		0.4	+891	
	4-21	4	19,487	22.7	85.8	563	113.5	5	-669	113.5	-5.9	50,437	4,100	125.3	65,350	4,100	135.5	52		52	-347	
		21	-19,800		-87.2	-562		-5	500		4.4	56,205		116.5	46,903		97.2	-52		-52	-301	
	13-12	13	5,969	8.7	686.1	-2	4.2	-0.5	17	4.5	3.8	-333	46	-14.9	-168	46	-4.2	0.1		0	-743	
		12	-5,972		-686.4	2		0.5	-23		-5.1	-1,627		-72.9	-70		-8.3	-0.1		0	-768	
	12-14	12	-10,619	17.4	-610.3	1	9	0.1	-13	8.4	-1.5	413	92	33.7	140	166	4.6	-0.1		0	+649	
		14	10,589		608.6	-1		-0.1	-12		-1.4	-252		-70.5	247		8.1	0.1		0	+637	
	14-15	14	-38	17.4	-2.2	4	9	0.4	70	8.4	8.3	-6,065	92	-494.4	375	166	12.3	1		0.3	-509	
		15	37		2.1	-4		-0.4	-91		-10.8	-5,847		-476.7	256		8.4	-1		-0.3	-487	
	14-1	14	34,063	38	896.4	-5	15	-0.3	9	23	0.4	-6,222	596	-130.5	-666	278	-13.8	3		0.2	-1,041	
		1	-34,133		-898.2	5		0.3	-46		-2	-931		-19.5	-538		-11.1	-3		-0.2	-929	
	1-17	1	63,923	67.5	947	13.7	27	5.1	-321	40.5	-7.9	68,374	1,506	68.1	21,893	737	201.4	-51		-3	-1,829	
		17	-64,022		-948.5	-13.7		-5.1	236		5.8	293		2.9	11,773		108.3	51		3	-1,060	
	17-18	17	-12,420	17.4	-713.8	15	9	1.7	-52	8.4	-6.2	5,533	92	45.1.1	2,195	165	71.9	1		0.3	+1,237	
		18	12,406		713	-15		-1.7	24		2.9	3,038		247.7	1,085		35.6	-1		-0.3	+996	
	18-19	18	12,718	17.4	730.9	8	9	0.9	-20	8.4	-2.4	225	92	18.3	725	166	23.8	-3		-0.9	-773	
		19	-12,740		-732.2	-8		-0.9	-2		-0.2	1,735		141.4	977		32	3		0.9	-906	
	19-4	19	30,397	41.9	725.5	17	16.2	1	-132	25.7	-5.1	13,371	968	207.2	2,121	434	34.2	-1		-0.1	-967	
		4	-30,438		726.4	-17		-1	65		2.5	10,614		164.5	2,027		32.7	1		0.1	-924	

附表8－2　Dゲート主桁間縦トラスⒷの断面力と応力　$D1_R$

位置	部材	節点	Fx 軸力	Fx A	Fx 軸応力	Fy せん断力	Fy Ay	Fy せん断応力	Fz せん断力	Fz Az	Fz せん断応力	My 曲げモーメント	My Iy	My 曲げ応力	Mz 曲げモーメント	Mz Iz	Mz 曲げ応力	Mx 捩れモーメント	Mx Ix	Mx せん断応力	最大応力	摘要
縦トラスⒷ	11-12	11	733	25.4	29	6	13.5	00	−6	11.88	−1	−220	129	−12	668	248	15	0.5		0	−56	
		12	−782		−31	−6		0	−1		0	756		44	742		16	−0.5		0	−91	
	12-15	12	9,290	25.4	365.7	−3	−13.5	−0.2	17	11.88	1.4	−2,886	129	−138.7	−141	248	−31	0.2		0	−508	
		15	−9,334		−367.5	3		0.2	−24		−2.0	−2,141		−124.5	−474		−10.4	−0.2		0	−502	
	15-1	15	7,622	25.4	300.1	43	13.5	3.2	20	11.88	1.7	−1,890	129	−109.9	2,614	248	57.3	6		0.8	−467	
		1	−7,666		−301.8	−43		−3.2	−31		−2.6	−3,928		−228.4	7,206		158.1	−6		−0.8	−688	
	1-18	1	−7,187	24.4	−294.5	66	12.6	5.2	33	11.84	2.8	−6,264	186	−303.1	11,260	334	220.5	3		0.3	−229	
		18	7,133		−292.3	−66		−5.2	−44		−3.7	−4,992		−241.5	7,969		156.0	−3		−0.3	−106	
	18-4	18	−15,209	24.4	−623.3	34	12.6	2.7	−38	11.84	−3.2	5,662	186	274	5,110	334	100.1	−4		−0.3	+997	
		4	15,155		621.1	−34		−2.7	27		2.3	3,799		183.8	4,650		91.1	4		0.3	+896	
	4-21	4	17,804	22.7	784.3	144	11.35	1.3	−136	11.35	−1.2	−12,788	4,100	−26.5	9,292	4,100	19.3	361		28.9	−830	
		21	−18,116		−798	−144		−1.3	−33		−0.3	23,150		48	19,491		40.4	−361		−28.9	−168	
	13-12	13	6,004	8.7	690	1	4.2	0	17	4.5	4	−348	46	−16	23	46	3	0.1		0	−709	
		12	−6,007		−690	−1		0	−23		−5	−1,599		−72	85		10	−0.1		0	−772	
	12-14	12	−10,690	17.4	−614.4	2	9	0.2	−13	8.4	−1.5	389	92	27.6	172	166	5.6	−0.1		0	+648	
		14	10,661		612.7	−7		−0.2	−13		−1.5	−346		−28.2	285		9.3	0.1		0	+650	
	14-15	14	−13	17.4	−0.7	2	9	0.2	76	8.4	9	−6,289	92	−512.7	275	166	9	1		0.3	−522	
		15	12		−0.7	−2		−0.2	−96		−11.4	−6,484		−524.5	13		0.4	−1		−0.3	−526	
	14-1	14	34,442	38.	906.4	14	15	0.9	−57	23	−2.5	−386	596	−8.1	1,061	278	21.9	11		0.9	−936	
		1	−34,511		−908.2	−14		−0.9	20		0.9	10,532		220.9	2,660		5.5	−11		−0.9	−1,184	
	1-17	1	61,203	67.5	906.7	93	27	3.4	−124	40.5	−3.1	35,352	1,506	352.1	14,673	737	135	−32		−1.9	−1,394	
		17	−61,302		−908.2	−93		−3.4	39		1.0	−15,236		−151.8	8,168		75.1	32		1.9	−1,135	
	17-18	17	−11,198	17.4	−643.6	13	9	1.4	−47	8.4	−5.6	5,109	92	416.5	2,098	166	68.8	1		0.3	+1,129	
		18	11,184		642.8	−13		−1.4	19		2.3	2,295		187.1	905		29.7	−1		−0.3	+860	
	18-19	18	11,480	17.4	659.8	1	9	0.1	−24	8.4	−2.9	917	92	74.8	655	166	21.5	−3		−0.9	−756	
		19	11,502		−661.0	−1		−0.1	2		0.2	2,061		168	799		26.2	3		0.9	−855	
	19-4	19	33,351	41.9	796	37	16.2	2.3	−238	25.7	−9.3	20,781	968	322	3,714	434	59.9	1		0.1	−1,178	
		4	−33,391		−796.9	−37		−2.3	171		6.7	29,010		449.5	5,426		87.5	−1		−0.1	−1,334	

土 木 研 究 所 報 告
第149号　1977年9月

標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の評価に関する研究

橋　本　　健*

Study on the Estimation of The Accuracy and Reliability of Areal Rainfalls by Sample Design Method

by Takeshi Hashimoto

Synopsis:

In this paper, the author applies Sample Design Method to the problems concerning the accuracy and the reliability of areal rainfall estimation. In this field, the Sample Reduction Method has long been used. However, so far as the latter method is concerned, there hardly seems chance to generalize the results which have been obtained in various river basins.

Sample Design Method, on the contrary, has a theoretical basis derived from statistics. In conclusion, the spatial distribution characteristics of rainfall is expressed by the coefficient of variance defined in area. The author performs a survey in the Naka River Basin to examine the relation between this areal coefficient of variance and topographical and hydrometeorological factors; namely drainage area, duration and intensity of rainfall and meteorological causes of rainfall.

The method is quite suitable for sythesizing the results in different river basins, suggesting a high possibility of establishment of criteria for the planning of rainfall observation networks after the sufficient compilation of actual data.

Key words (Areal Rainfalls, Accuracy, Reliability, Sample Design Method, Synthisis)

要　　旨

本研究は，面積雨量を，点雨量観測に基づいて推定する場合の，精度と信頼度の評価法に関するものである。

第一章においては，この分野における過去の調査，研究法の主流であった間引き法について概観する。すなわち，5つの代表的な調査，研究について，その方法および結論を，統一的な視点で整理し，間引き法の方法上の限界について議論する。

第二章は，標本計画法に関するもので，本論文の中心である。第一に，米合衆国気象庁水文部がMuskingum流域で行なった調査研究を紹介する。次いで，その基礎となっている理論を，降雨の実態に適合し，計画論的な扱かいも可能なように，拡張する。モンテ・カルロ・シミュレーションを用いている。この段階で，標本計画法が

* 前河川部水文研究室研究員（現近畿地建猪名川工事事務所調査課長）

面積雨量の推定精度，信頼度の評価に対する有効な手法たり得ることが明らかになる。降雨の空間分布特性は，面積的に定義された降雨の変動係数 C_v に要約して表現される。この章の第三の部分は，中川流域でなされた現地調査およびその結果で，C_v と流域面積，降雨継続時間との関係が明らかにされる。最後に，本邦諸河川の資料を援用し，C_v と流域面積，降雨継続時間，降雨強度，降雨の気象学的原因，流域地形との関係について，考察がなされる。

第三章は結論であり，第一章および第二章の結論が要約して示されている。

キーワード（面積雨量，推定精度，信頼度，標本計画法，総合化）

目　　次

まえがき …… (2)
1. 間引き法による既往の研究とその成果 …… (3)
〔1〕 Linsley, Kohlerによる研究 …… (3)
〔2〕 磯原地区雨量調査 …… (3)
〔3〕 中川による研究 …… (3)
〔4〕 小林による研究 …… (3)
〔5〕 竹内・江川・神谷による研究 …… (4)
〔6〕 総　括 …… (4)
2. 標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の評価 …… (5)
〔1〕 米合衆国気象台（U.S.Weather Bureau）による調査・研究 …… (5)
〔2〕 理論の拡張 …… (6)
〔3〕 中川流域における現地調査とその結果 …… (9)
〔4〕 C_v の諸特性 …… (12)
3. 結　論 …… (12)
あとがき …… (13)

ま え が き

雨量調査は，多くの河川調査の重要な第一歩である。また，通信・処理技術の高度化に伴ない，従来は非常に困難とされてきた，水系の同時的・適応制御的管理が最近の大きな課題となっているが，ここでも，基本的な入力が雨量であることはいうまでもない。

現在，雨量観測の主流は，地点雨量観測である。レーダ雨量計のように，直接に面観測を行なう器機は，開発途上であり，この傾向は当分の間続いていくものと考えられる。

河川流域では，雨量を面積雨量として把握する必要があることが多い。地点雨量観測に基づく場合，当然，面積雨量は推定されなければならない。現実に生ずる問題の多くは，次の2つに要約される。

① 面積雨量の推定法に関する問題

すでに設置された有限個の観測所で観測された雨量のみを用いて，面積雨量の最良の推定値を得る方法の問題である。算術平均法，ティーセン法，等雨量線法，代表係数法などが，既に提案されている。

② 観測所の配置法に関する問題

所与の精度・信頼度で面積雨量を推定するに必要な，最小の観測所数およびそれらの配置位置を求める問題である。

本研究では，第二の問題を対象とする。配置法の問題へのアプローチとしては，2つの方法が考えられる。すなわち①「間引き法」と②「標本計画法」である。以下両者を概説してみる。

① 間引き法（Sample Reduction Method）

流域内に高密度で配置された雨量計により，精密な雨量観測を行なう（精密観測と呼ぶことにする）。精密観測から推定された面積雨量を真値と仮定する（仮想真値と呼ぶことにする）。ついで，机上で，同じ降雨について段階的に観測所を間引いていく（間引き）。この間引きは，乱数表や正方格子を用いてなされ，人為的な片寄りを防ぐ工夫がされる。間引き後の観測所だけをもとに，面積雨量を推定し直す。当然，仮想真値と異なる推定値が得られる。この差を誤差とする。多数の降雨についてこれを繰り返し，平均の誤差と観測所密度との関係を求める。この関係を誤差公式，すなわち代数式，図，表などの形で整理する。最後に必要精度が与えられれば，公式を逆に解いて，必要な観測所密度を求めることができる。

② 標本計画法（Sample Design Method）

母集団（population）として流域に分布する降雨全体を考える。観測雨量は，この母集団からの標本（sample）と見なせる。観測所雨量を何らかのやり方で平均して面積雨量を推定することは，標本平均によ

る母平均の推定に他ならない。統計学的には，標本平均は標本抽出（sampling）毎に変わる確率変量である。標本平均の分布は，母集団の分布と標本数（sample size）によって決定される。したがって，母集団の分布を知れば，所与の精度・信頼度で母平均（面積雨量）を推定するに必要な標本数（雨量観測所数）を求めることができる。

1　間引き法による既往の研究とその成果

現在行なわれている雨量計配置計画基準は，すべて，間引き法にもとづく研究・調査の結果を根拠として作成されている。特に，戦後間もなく中央気象台が実施した磯原地区雨量調査は，関係方面の注目を集め，ひとり気象庁のみならず，他の多くの機関がこれを重視してきた。そして，「50～150㎢あたり1観測所」という基準が，過去20年あまり，支配的な地位を保つに至った。

本章では，既往の間引き法による研究例を概観し，その方法論について考察するという，一種のhistorical survey を行なう。

〔1〕 Linsley, Kohlerによる研究（1951年）[1]

Linsley, R.K.とKohler, M.A.は，Ohio州において，220 mi^2 の地域に55個の雨量計を設置し，精密観測を実施した。面積雨量の推定誤差 E は，面積雨量 P，流域面積 A および雨量観測所数 n の関数

$$E_A = KP^{\alpha}n^{\beta} \quad \cdots\cdots (1)$$

であるとし，面積220，160および100 mi^2 について K，α，β を求めた。

$$E_{220} = 0.186\,P^{0.47}\,n^{-0.60} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$E_{160} = 0.181\,P^{0.36}\,n^{-0.52} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$E_{100} = 0.176\,P^{0.44}\,n^{-0.73} \quad \cdots\cdots (4)$$

ただし，P の単位は inch である。更に，K は面積 A の関数で

$$K = k \cdot A^{c} \quad \cdots\cdots (5)$$

であると考えられるとした。

〔2〕 磯原地区雨量調査（1952年）[2]

中央気象台の立案に基き，東京管区気象台およびその管下の水戸測候所は，昭和25年9月より，同26年10月まで，14箇月間にわたり，茨城県磯原を中心とする半径約39㎞の地域内に計51個の雨量計（主として普通雨量計）を配置して精密観測を実施した。一連降雨30㎜以上のものを対象に，雨量観測所数と誤差との関係を求めたものが表－1である。ただし，同表は，最大密度（雨量計24個）の推定値にも，3％程度の誤差があるとして，これを加えたものの包絡線に相当する値である。同調査の報告書は，結論として「おおよそ1割の誤差に止めるためには観測所を70㎢当り1ケ所を設置する事が必要である」と述べている。

表－1　磯原地区における誤差公式

観測所数	3	6	9	12	15	18	21	24
同上密度	280㎢当り1点	140	90	70	60	50	40	35
誤差％(±)	25	18	13	10	8	6	5	3

〔3〕 中川による研究（1956年）[3]

中川は，筑後川右支川宝満川流域（189.4㎢）に，14個の雨量計を設置し，昭和30年に精密観測を行なった。結果の整理は，等雨量線法と算術平均法とで行なわれている。表－2に示す。

〔4〕 小林による研究（1960年）[4]

小林は，只見川支川田子倉流域（745㎢）における昭和28年から同32年までの夏季降雨の観測値をもとに間引き法を行なった。ここで注目すべきことは，降雨の面積的なバラツキをパラメータとして導入していることである。すなわち，降雨の面積的な標準偏差 σ を次式で定義する。

表－2　宝満川流域における誤差公式

観測点数	2	4	6	8	10	12	14
流域面積／観測点数（㎢）	94.7	47.4	31.6	23.7	18.9	15.8	13.5
等降水量線図網目法による面積雨量（㎜）	245.4	241.6	234.3	234.8	233.8	227.2	229.3
同上による14点使用のもの＊を真の値とした時の誤差（％）	7.0	5.4	2.2	2.4	2.0	0.9	0.0
算術平均法による面積雨量（㎜）	254.0	249.5	237.7	233.6	235.4	227.9	229.2
＊と同様な誤差（％）	10.8	8.9	1.7	1.9	2.6	0.2	0.0

$$\sigma^2=\int_A (p-P)^2\,dA/A \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

ただし，Aは流域面積で$A=\int_A dA$，Pは面積雨量で$P=\int_A p\,dA/A$，pは地点雨量である。

小林は，田子倉流域について，2種の誤差公式を求めている。ただし対象は，10㎜以上の一連降雨である。面積雨量Pの推定誤差をΔPとすると，

$$\Delta P=0.819\cdot\sigma^{0.991}\cdot n^{-0.636} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

$$\frac{\Delta P}{P}=0.819\cdot\frac{\sigma}{P}\cdot n^{-0.636} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

σ/Pについて，小林は，田子倉流域の部分流域等についても求めている。その値は表－3の通りである。このσ/Pを，小林自身は，「流域特性を表わす量で，降雨特性係数とよぶことにする」と言っているが，これは統計学でいうところの変動係数（coefficient of variance）を面積的に定義したものにほかならない。小林は，表－3の各流域について，簡単な地形分析を行ない，σ/Pが「流域面積や流域地形をも代表し得る因子である」と推定している。

表－3　σ/pの値（小林による）

流域	流域面積（㎢）	σ/P
田子倉	745	0.34
銀山平	278	0.19
下流部	328	0.24
北の岐	139	0.25
内川	501	0.28
大桃	204	0.25
館岩	297	0.23

〔5〕竹内，江川，神谷による研究（1961年）[5]

竹内らは，昭和27年から同31年にかけて神流川流出試験地（373.6㎢）で得られた102降雨の資料をもとに，間引き法を実施した。推定法は，等雨量線法，ティーセン法，算術平均法である。

〔6〕総　括

以上，主要な調査・研究を紹介したが，まず気付くことは，研究毎に面積雨量の推定誤差に影響を及ぼすとして取り上げる説明変数の数と種類が異なることである。これを分類すれば次のようになる。

① 観測所数のみ
　磯原地区，宝満川，神流川

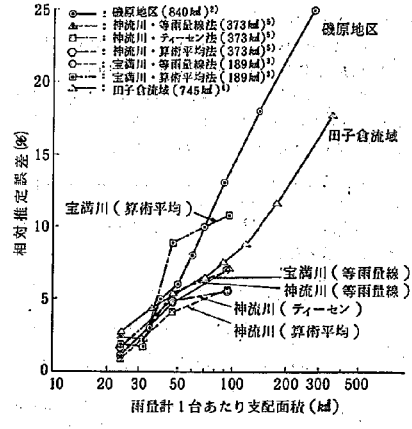
② 観測所数，流域面積，降雨量
　Linsley et al. による研究

③ 観測所数，流域面積，降雨特性係数
　小林による研究

一般に，複数個の流域を扱うと，説明変数の数を複数にしなければならなくなるようである。

次に，これについて触れているのは磯原地区と神流川のみであるが，たとえ精密観測を行なっても，雨量計の個数が有限である限り，それで真値が得られたことにはならない，という問題がある。磯原地区の場合には，雨量計のない部分の等雨量線を「勘」で補うといった方法を，また神流川では仮想真値を第一近似とし，第二，第三近似を求めるという方法を採っている。いずれも，根拠薄弱である。

図－1に研究例〔2〕から〔5〕の結果を（雨量計支配面積）～（推定誤差）の関係で取りまとめて示す。図からわかるように，その関係は，かなりバラツイている。なぜ流域によってこのように異なるかということは，この図だけからは判然としない。小林が提出したσ/Pは，その意味でひとつの足掛りになるかも知れない。しかし，その場合にも，(7)式や(8)式の係数，



図－1　間引き法による既往の研究成果

指数が流域によってほとんど変化しない普遍定数かといえば，それは，数多くの流域において間引き法を実施してみなければ何とも言えない。そして，間引き法には，仮想真値（真値ではない）を得るために，かならず精密観測を行なわなければならないという，方法論上の宿命がある。

2　標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の評価

ここで標本計画法（sample design method）と呼ぶ方法の概要は，まえがきに述べた通りである。この方法は，近代数理統計学に基礎を置いた普遍的な方法であり，前章の間引き法も，これから説明できる。数理統計学が系統的な形で我が国に紹介され始めたのは，1950年代に入ってからである。そして，現在では，品質管理，実験計画等の分野で不可欠の手法として広く普及していることは周知の通りである。

標本計画という名称も，雨量観測をひとつの実験と見なし，必要な標本数を計画するという意味で，実験計画の範ちゅうに属することから生じている。

米合衆国気象台（U. S. Weather Bureau）水文部では，この理論にもとづく初歩的な調査を，すでに，1947年に実施している。ただ疑問とされるのは，この成果がその後引き続き研究された形跡がないことである。ひとつ考えられることは，水文学の分野に，その時点でこれを受け入れるべき数理統計的基盤が発達していなかったことである。

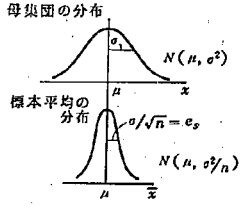
本研究の主題は，標本計画法を，充分実用に耐える段階まで総合化することにある。そこで①U.S.W.B.の調査，研究のreview，②理論的拡張，③現地調査，④方法の総合化の順で論を進める。

（1）米合衆国気象台（U.S.Weather Bureau）による調査・研究（1947年）[6]

米合衆国気象台では，Muskingum流域での精密な観測に基づき，標本計画法による雨量観測所配置法の研究を行なった。必要に応じ補足を加えながら，その主旨と結論の一部を述べてみる。

（1）理論的背景

統計学における次の定理による（図－2参照）。



図－2　標本による母平均の推定

「正規母集団$N(\mu, \sigma^2)$から大きさnの標本を任意抽出した場合の標本平均$\bar{x}=\sum_{i=1}^{n} x_i/n$の分布は$N(\mu, \sigma^2/n)$なる正規分布をする。」

σ^2/nの平方根$\sigma/\sqrt{n}$は，標本平均についての標準偏差という意味で，標準誤差（standard error）と呼ばれている。いまこれをe_sで表わす。すなわち，

$$e_s=\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

e_sは，xと同一の単位を持つ。そして標本平均と母平均との差の目安になる。両者の差の絶対値がe_sを下廻る確率は，いわゆる「1シグマ内」であるから，約68.3％である。便利のため，(9)式の両辺を母平均μで除し，$\varepsilon_s=e_s/\mu$を標準相対誤差と呼ぶことにする。すなわち，

$$\varepsilon_s=\frac{e_s}{\mu}=\frac{\sigma}{\mu}\cdot\frac{1}{\sqrt{n}}=\frac{C_v}{\sqrt{n}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

となり，ε_sは母集団の変動係数C_vと標本数の平方根$\sqrt{n}$の商で表わされる。C_vは，前章で引用した小林によるσ/Pと全く同じものである。(8)式の0.819を1に，－0.636を－0.5にすると，(10)式と一致することがわかる。

（2）面積雨量推定への応用

母集団を流域内に分布した降雨全体，標本を観測所雨量と考えれば，次の対応関係は明らかである。

母平均μ ←→ 真の面積雨量

標本平均$\bar{x}$ ←→ 推定された面積雨量

そして，「面積的な変動係数がC_vである降雨の面積雨量を，nケ所の観測所雨量から推定するならば，危険率31.7％で相対誤差は$\varepsilon_s=C_v/\sqrt{n}$である」という命題が得られる。

C_vの母数は，

$$C_v=\sqrt{\int_A (x-\mu)^2\, dA/A}\Big/\mu \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

ここに，xは地点雨量，$\mu=\int_A x\,dA/A$，$A=\int_A dA$である。また，標本統計量としては，

$$\widehat{C_v}=\sqrt{\frac{1}{n-1.5}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\Big/\bar{x} \quad \cdots\cdots\cdots (12)$$

ただし，x_iは第i観測所の地点雨量，$\bar{x}=\sum_{i=1}^{n} x_i/n$である。もし，$x_i$に重み$w_i=A_i/A$をかけるなら，

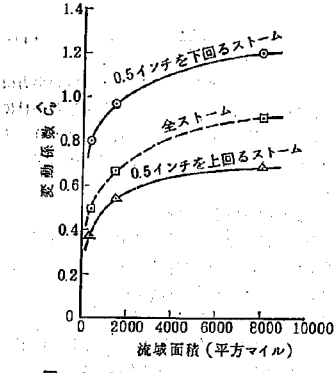
$$\widehat{C_v}=\sqrt{\frac{n}{n-1.5}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 w_i}\Big/\bar{x} \quad \cdots (13)$$

$$=\sqrt{\frac{n}{n-1.5}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\cdot A_i/A}\Big/\bar{x} \quad \cdots (13)'$$

で推定する。これは，ティーセン法，代表係数法などに対応する。ただし，A_iは第i観測所の支配面積で$A=\sum_{i=1}^{n} A_i$，$\sum_{i=1}^{n} w_i=1$である。

(3) Muskingum 流域の$\hat{C}_v$

降雨の面積的分布に関する特性は，すべてC_vの中に集約されたことになる。しかし，C_vが流域ごと，降雨ごとに異なることは事実である。観測所配置計画などでは，不特定多数の降雨を対象としなければならない。そこで，Muskingum流域では，1937年から1941年にかけて観測された38降雨の，最大6時間部分を対象として平均的なC_vを求めている。流域面積としては，375，1,500，8,000 mi^2 の3種を取り上げている。結果を図－3に示す。



図－3　Muskingum流域における降雨の面積的変動係数

(4) 降雨の母分布

以上の議論の前提は，「正規母集団$N(\mu, \sigma^2)$から……」の中にある。一般には，降雨の母分布は非正規である。図－4に，3つの流域について2降雨ずつ正規分布をあてはめた例を示す。流域の一部に無降雨域がある場合には，この例からもはるかにかけ離れた分布をすることは言をまたない。

〔2〕理論の拡張

ここでは，Muskingum流域で採られた理論を，一般の降雨現象に適用ができるように拡張する。また，精度・信頼度（誤差，危険率）の評価法について述べる。

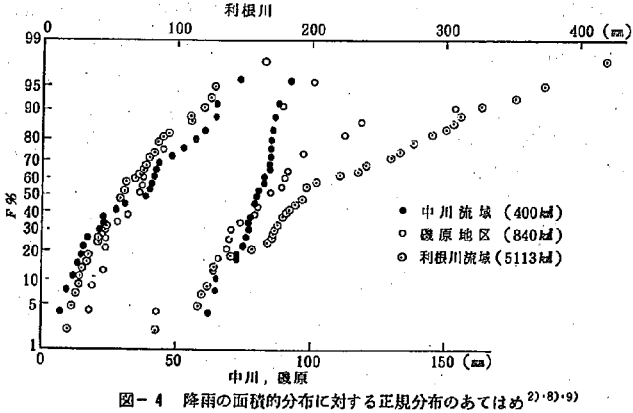
(1) 中心極限定理とモンテカルロ法によるその適用性の検討

非正規の分布に関する類似の定理，すなわち中心極限定理（central limit theorem）は，降雨の一般的な現象に適している。すなわち，

「母平均μ，母分散σ^2の任意の母集団から大きさnの標本を任意抽出した場合の標本平均 $\bar{x}=\sum_{i=1}^{n} x_i/n$ の分布は，nが十分大きければ，$N(\mu, \sigma^2/n)$なる正規分布に近似する。」

ここで，「nが十分大きければ」とか「近似する」とかいう部分が実用上満足できるものであるならば，Muskingum流域の方法は，その適用範囲を格段に拡げることがわかる。ただし，この定理は，証明そのものは厳密になされているが，任意の非正規分布についての適用性を理論的に取り扱うということはできない。

このような場合には，OR技法の一つであるモンテカルロ法が有効である。ここでもその手法を用いる。すなわち，図－5(a)のような錐形のモデル降雨を考える。流域面積Aのうち，$k^2 \cdot A$には降雨があるが，$(1-k^2) \cdot A$は無降雨とする。ピーク雨量を$3/k^2$とすれば，面積雨量は常に1である。このようなモデル降雨は，現



図－4　降雨の面積的分布に対する正規分布のあてはめ[2)・8)・9)]

実の降雨に近いし，もちろん分布は非正規である。確率密度関数を図－5(b)に示す。ここに，$\delta(x)$はDiracのdelta関数で，

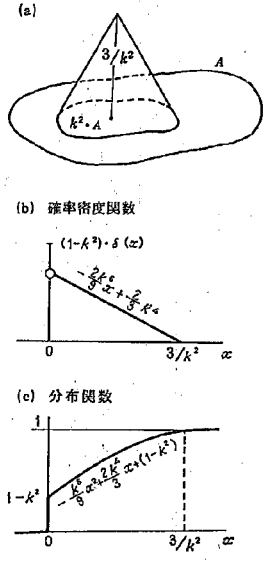
$$\int_{-\infty}^{\infty}\delta(x)dx=1,\ \delta(t)=0\ (t\neq 0)\cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

によって定義される。同図(c)は分布関数である。

シミュレーションは次の方法で行なった。

① 〔0，1〕区間の一様乱数をm個取り出す。r_1，r_2，……，r_mとする。

② 図－5(c)の分布関数によって，r_iを雨量x_iに変換する。x_1，x_2，……x_mとする。



図－5　モデル降雨

③ 平均値 $\bar{x}=\sum_{i=1}^{m}x_i/m$ を求める。

④ ①から③までを多数回（ここでは10,000回とした）繰り返す。

⑤ $\bar{x}$の頻度，平均値，分散を求める。

⑥ ①から⑤までをkを変えて実施する。

モデル降雨の分散（母分散）σ^2は次の通りである。

$$\sigma_k^2=\frac{3}{2k^2}-1\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

中心極限定理が成立するなら，⑤で求められる頻度分布は正規型になり，$\bar{x}$の平均値は1，分散はσ_k^2/mにになる。

結果を図－6および表－4に示す。図において，ヒストグラムはシミュレーションの結果，曲線は$N(1,\sigma_k^2/m)$の理論値である。まず，(1),(2),(3)の順で比較すると，m（観測所数）が増加するに従って，$\bar{x}$の推定値が真の値1の廻りに集中してくることがわかる。これは，分散σ_k^2/mが小さくなってくる効果に他ならない。次に，(2),(4),(5),(6)の順に比較すると，この順でヒストグラムと曲線の乖離が著しくなっていく。特に，(6)においては，推定された平均値$\bar{x}$のうち，18～19％が区間〔0，0.5〕に落ちている。つまり，この頻度で，現実には降雨があるにもかかわらず，雨なしと判定してしまうことになる。(5)の程度まで許容できるとするなら，雨域の面積率が30～40％を下限として中心極限定理が適用できることになる。

(2) 危険率（信頼度）の評価

標準相対誤差ε_sを用いる(10)式では，危険率は31.7％に固定される。危険率も変数として扱うと次のようになる。

標本平均$\bar{x}$の分布が近似的に$N(\mu,\sigma^2/n)$であるので，これを次式によって規準化する。

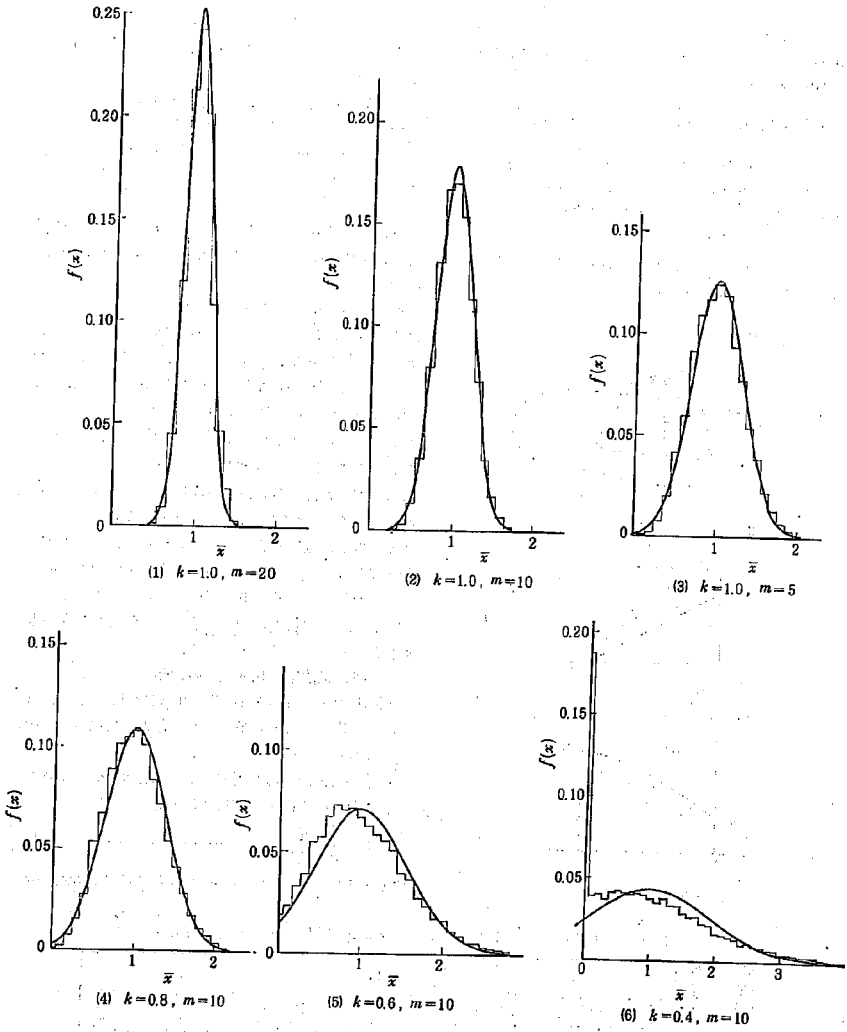
$$Z=\frac{\bar{x}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

するとZは，近似的に$N(0,1^2)$なる標準正規分布に

表－4　モデル降雨によるシミュレーションの結果（平均および分散）

k＼m パラメータ	5 平均	5 分散	10 平均	10 分散	20 平均	20 分散
1.0	1.0000 1.0032	1.00000×10^{-1} 0.98352×10^{-1}	1.00000 0.99807	5.0000×10^{-2} 4.9486×10^{-2}	1.00000 0.99910	2.5000×10^{-2} 2.5109×10^{-2}
0.8	1.0000 1.0031	2.6874×10^{-1} 2.6318×10^{-1}	1.00000 0.99660	1.3437×10^{-1} 1.3158×10^{-1}	1.00000 0.99843	6.7185×10^{-2} 6.7111×10^{-2}
0.6	1.0000 1.0033	6.3334×10^{-1} 6.1859×10^{-1}	1.00000 0.99568	3.1667×10^{-1} 3.0508×10^{-1}	1.00000 0.99753	1.5839×10^{-1} 1.5667×10^{-1}
0.4	1.0000 1.0040	1.6750×10^{0} 1.6367×10^{0}	1.00000 0.99273	8.3750×10^{-1} 8.1083×10^{-1}	1.00000 0.99479	4.1875×10^{-1} 4.1162×10^{-1}

上段は，中心極限定理が成り立つとした場合の理論値で，下段は，シミュレーションの結果である。



図－6 モデル降雨によるシミュレーションの結果（頻度分布）

なる。推定値の相対誤差 ε は，

$$\varepsilon=\frac{\bar{x}-\mu}{\mu} \quad \cdots\cdots (17)$$

となる。(16) 式と (17) 式より，

$$z=\varepsilon\frac{\sqrt{n}}{C_v} \quad \cdots\cdots (18)$$

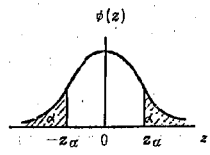
が得られる。図－7に示す標準正規分布において，片側危険率 α に対応する z を z_α とすると，危険率が 2α

を上廻らないためには，$|z| \geq z_\alpha$ であればよい。(18)式より，

$$|\varepsilon| \cdot \frac{\sqrt{n}}{C_v} \geq z_\alpha \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

となる。

ただし，このような議論は，雨量計配置計画に伴なって生じてくるもので，結果としての面積雨量の精度の評価とは異なる問題である。配置計画に関連すると考えられる C_v の特性については，〔4〕で扱う。



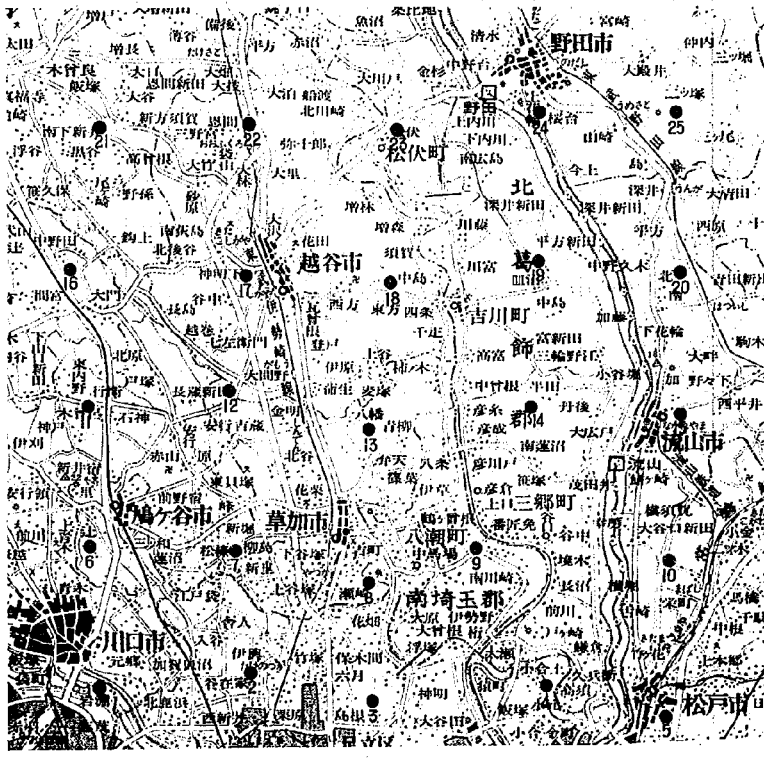
図－7　危険率の評価

〔3〕中川流域における現地調査とその結果

前節までで理論的考察を終わる。降雨の分布特性を集約した C_v に影響を与えると考えられる要因としては，①流域面積，②降雨継続時間，③降雨強度，④降雨の気象学的原因，⑤流域地形，などが主なものである。これらの大部分は，次節で述べるように，既往の観測成果をもとに検討が行なえた。ただ，降雨継続時間については，これを解析するに足る詳細な資料が得られなかったので，現地調査を行ない，実測資料を入手した。現地調査の詳細は，土木研究所資料第999号として別途上梓済みである。

（1）調査の方法

図－8に示すように，赤羽・岩槻・野田・松戸の4地点によって囲まれる地域に，25台の週巻自記雨量計（受水口径200mm，0.5mm転倒桝型）を，ほゞ4kmの正方格子状に配置した。この地域の大部分は，埼玉県の



図－8　調査地域および雨量計設置地点

中川流域の低平地に属する。観測期間は，昭和48年7月～10月，同49年6月～9月の各4ケ月である。雨量計1台当りの支配面積は16㎢，全雨量計によってカバーされる最大面積は400㎢である。観測によって得られた雨量（0.5㎜単位）を，各々の観測所について，3時間雨量で整理した。週巻きの器械であったため，時間の分解能は3時間が限界であった。

（2）調査の結果

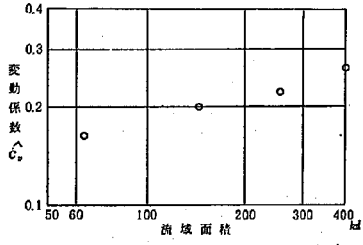
上記の8ケ月間に，25観測所の算術平均が10㎜を越える一連降雨は，48個得られた。これを解析対象とする。

まず，流域面積との関係であるが，表－5のように観測所を組み合わせることにより，400，256，144，64㎢の4種の面積について$\hat{C}_v$を求めた。結果を表－6および図－9に示す。流域面積の増大に伴ない，$\hat{C}_v$が増大することは，Muskingum流域での調査結果と一致している。

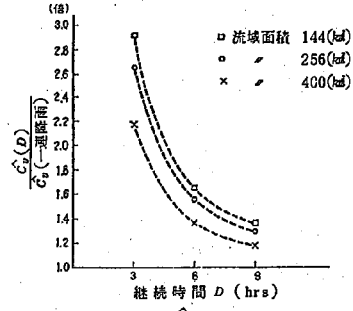
次に，継続時間との関係について解析した結果を図－10にあげる。同図では，一連降雨について得られた$\hat{C}_v$を基準にして，3，6，9時間雨量の$\hat{C}_v$の倍率で表示してある。短時間になると，急激に$\hat{C}_v$が増大していくことがわかる。(10)式または(18)式に見るよう

表－5　組み合せ観測所番号表

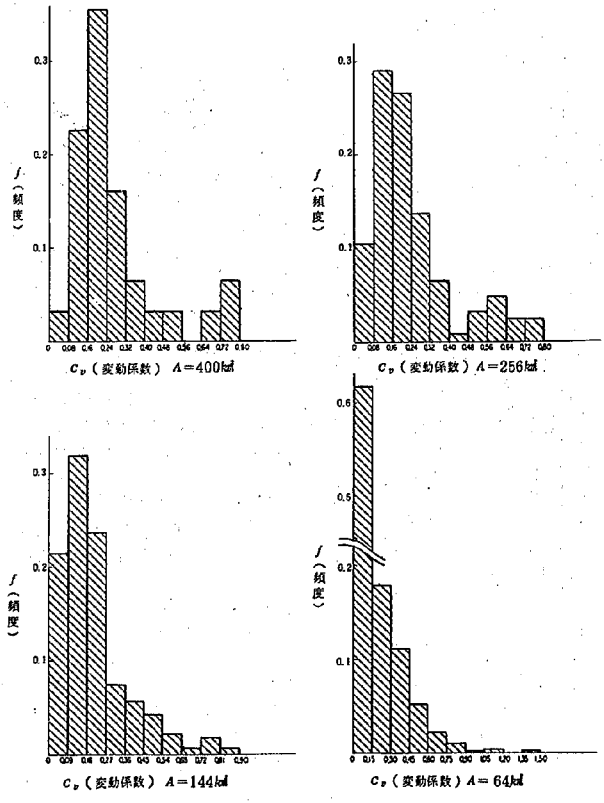
組み合せ番号＼対象面積	400㎢	256㎢	144㎢	64㎢
1	1～25 全部	1～4, 6～9, 11～14, 16～19	1, 2, 3, 6, 7, 8, 11, 12, 13	1, 2, 6, 7
2		2～5, 7～10 12～15, 17～20	2, 3, 4, 7, 8, 9, 12, 13, 14	2, 3, 7, 8
3		6～9, 11～14 16～19, 21～24	3, 4, 5, 8, 9, 10, 13, 14, 15	3, 4, 8, 9
4		7～10, 12～15 17～20, 22～25	6, 7, 8, 11, 12, 13, 16, 17, 18	4, 5, 8, 9
5			7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18, 19	6, 7, 11, 12
6			8, 9, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 20	7, 8, 12, 13
7			11, 12, 13, 16, 17, 18, 21, 22, 23	8, 9, 13, 14
8			12, 13, 14, 17, 18, 19, 22, 23, 24	9, 10, 14, 15
9			13, 14, 15, 18, 19, 20, 23, 24, 25	11, 12, 16, 17
10				12, 13, 17, 18
11				13, 14, 18, 19
12				14, 15, 19, 20
13				16, 17, 21, 22
14				17, 18, 22, 23
15				18, 19, 23, 24
16				19, 20, 24, 25



図－9　流域面積と変動係数（中川流域）



図－10　継続時間による $\hat{C}_v$ の変化（12降雨の平均）



図－11　変動係数の頻度分布

表－6　変動係数 $\hat{C}_v$

流域面積 (km²)	400	256	144	64
変動係数の平均値 $\hat{C}_v$	0.263	0.222	0.199	0.163

に，C_v の2乗に比例して必要観測所数 n が増すのであるから，この結論は，たとえば洪水到達時間（支配時間）の短い流域において，深刻な問題を提起するものであるといえる。

最後に，参考として，変動係数 $\hat{C}_v$ の頻度分布を図－11にあげておく。流域面積が小さくなるに従って非対称性が強くなり，64 km²では典型的なJ型分布になっていることがわかる。この原因は不明である。

〔4〕 C_v の諸特性

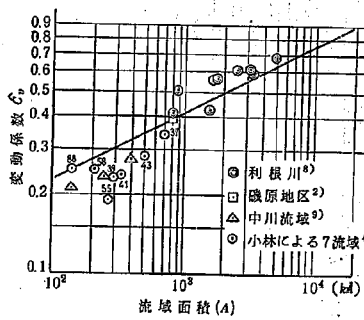
本節においては，C_v に影響を与えると考えられる主たる要因について，本邦の諸河川流域で得られた資料をもとに考察する。降雨の面積的な分布特性を集約した変動係数 $\hat{C}_v$ についてこのような作業を行なうことは，標本計画法の総合化を行なうことにほかならない。

（1） 流域面積

C_v は流域面積の増大に伴ない増大する。図－3，図－9にもその傾向が見られるが，更に資料を追加したものを図－12に示す。図中の傾向線は次式である。

$$\hat{C}_v = 0.075\,A^{0.25} \quad \cdots\cdots (20)$$

同図の基礎資料は，ある期間内の一連降雨で，流域平均雨量 10mm 以上のものすべてを取り上げた。



図－12　流域面積と変動係数（全国）

（2） 降雨継続時間

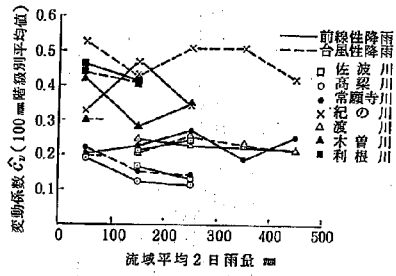
C_v は降雨継続時間として短時間を取るほど大きくなると考えられる。この命題の実証資料としては，前節の中川流域のものしかないが，降雨域というものが，（降雨セル）→（メソ雨域）→（ラージスケール雨域）という階層構造をしており，かつ，スモールスケールのもの程寿命が短い，ということからも考えられることである。

（3） 降雨強度

極端な弱雨の範囲では，降雨強度の増大に伴ない C_v が増大するが，ある程度以上の強雨に対しては，C_v は降雨強度によらない。Muskingum流域の例では，0.5 inch（12.7mm）を境界にストームを分類しているが，実用的には，0.5inch 以下の降雨は問題にならない。図－13に，100mm単位で流域平均2日雨量を分類したものを示す。ただし，0～100mm では 50mm 以下のものを除いてある。この図に見るように，$\hat{C}_v$ は降雨強度の影響を受けないといっても，実用上差しつかえない。

（4） 降雨の気象学的原因

雷雨程度のものは別として，前線性降雨と台風性降雨とで分類した図－13では，有意な差は認められない。



図－13　2日雨量と変動係数[8),9)]

（5） 流域地形

降雨が主として対流性降雨と地形性降雨から成っていることから，地形の起伏が大きい流域では，平坦なものに比し，C_v が大きくなることが推定される。今回の研究では，これを実証するに足る充分な資料を得ることができなかった。ただ，図－12のプロットのうち，小林による7流域については，小林が主流路に沿って計算した高度傾度（落差／延長，m/km）が添えてある。これに関する小林の考察は前述の通りである。

3　結　論

本研究の結論は以下の通りである。

(1) 間引き法は，個々の流域について誤差公式を求ることができる方法であるが，流域相互の結果の比較に関しては有効な方法といえない。

(2) 標本計画法は，現実の降雨に対しても，実用上充分な範囲で理論の成立が期待できる方法である。

(3) 降雨の空間的分布特性は，面積的に定義された降雨の変動係数 C_v によって集約的に表現できる。

(4) C_vは，対象とする流域面積，降雨の継続時間および強度，気象学的原因，流域地形によって変化すると考えられるが，最も支配的な要因は，流域面積および降雨継続時間である。

(5) 標本計画法は，点雨量観測に基づく面積雨量推定に関連した2つの主要な課題，すなわち，面積雨量の精度の評価，ならびに雨量計配置計画法に対する有効な方法となり得る。

あとがき

本研究の前提は，降雨の面積的なバラツキの程度が，流域内一様ということである。この前提条件が成立しない場合，たとえば流域がほゞ同じ広さの山地と平地とから構成されている時には，それぞれについて独立に手法を適用する必要がある。

一様の前提が満足されたとしても，本論では，雨量観測所相互の位置関係については何も触れていない。すなわち，片寄りがないことだけを条件としている。

第2章，第4節でも述べたように，降雨の分布に地形が及ぼす効果については未だ解明の済んでいない部分が多い。本研究のように確率統計的な接近法（stochastic approach）によるほか，近い将来力学的な接近法（dynamic approach）によっても研究の進展することが期待される。

終わりにあたって，中川流域雨量調査で支援をいただいた関東地方建設局，江戸川工事事務所の職員の皆様，資料収集に御協力を下さった日本気象協会研究所吉田作松博士ならびに関東地方建設局・利根川ダム統合管理事務所の皆様に深甚の謝意を表させていただきます。また，この研究の遂行にあたっては，前水文研究室・現東北地方建設局の佐藤一郎技官が，終始，良きパートナーであったことを付記する。

参考文献

1) Linsley, R.K., Kohler, M.A., "Variations in Storm Rainfall over Small Areas", Transaction of A.G.U., Vol. 32, 1951.
2) 中央気象台，「磯原地区雨量調査」，昭和27年
3) 中川吉雄，「雨量観測地点の密度と面積雨量」，天気，Vol. 3, No. 2, 昭和31年
4) 小林勉，「平均雨量の誤差と雨量計の数および計算方法との関係」，電力気象連絡会彙報，Vol. 11, No. 1, 昭和35年
5) 竹内俊雄，江川太郎，神谷隆太郎，「山地流域における一雨雨量の降雨分布について」，土木研究所報告，No. 106, 昭和36年
6) U. S. Weather Bureau, "The Reliability of Areal Rainfall Determination", Hydrometeorological Report, No. 5, 1947
7) 岸根卓郎，「統計学」，養賢堂，昭和41年
8) 関東地方建設局利根川ダム統合管理事務所，「利根川上流洪水調節計画解析検討報告書・雨量資料編 I, II」，建設省，昭和42年
9) 第27回建設省技術研究会，「計画降雨に関する研究」，建設省，昭和48年
10) 三宅貸，「雨量観測点の密度と面積雨量の観測精度」，水利科学，Vol. 17, No. 4, 昭和48年

（昭和52年3月16日原稿受理）

土 木 研 究 所 報 告
第149号　1977年9月

流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究(I)

岩　松　幸　雄 *
関　　正　和 **
吉　川　勝　秀 ***
三　好　逸　二 ****

A Study on Water Budget and Water Resources Allocation in a Region (I)

by Sachio Iwamatsu
Masakazu Seki
Katsuhide Yoshikawa
Itsuji Miyoshi

Synopsis:

In this paper, natural and artificial water budget in a region is estimated synthetically, and water resources allocation is studied from a comprehensive and multiobjective viewpoint.

The water resources correlation matrix is proposed first, as a method to express water budget inclusively. Then the method to allocate water resources is examined on the basis of the above method, from a multiobjective standpoint including economic, social, eviromental respect and so on.

Finally it is followed by the case study at the Nara Basin in the valley of the Yamato River, to which these methods were applied.

Key words　Water budget, Water resources correlation matrix, Multiobjective allocation, Decomposition principle, Linear programing, Basin management.

要　旨

本論文では，流域（地域）内の水循環を総合的に把握し，それに基づいて水資源を総合的かつ多角的な観点から配分する方法を考察する。まず，水循環を総合的に把握する方法として，「水資源連関表」を提案する。次に，この把握方法をもとにして，流域（地域）の水資源を，総合的かつ経済・社会・環境等の多角的な観点から合理的に配分する方法を考察する。

さらに，これらの方法を大和川流域の奈良盆地に適用し，ケース，スタディを行なった結果を報告する。

キーワード（水循環，水資源連関表，水資源配分，多目的配分，線形計画法，分解原理，流域管理）

*　土木研究所企画部　システム課課長
**　土木研究所企画部　システム課研究員（現在Iowa 大学留学中）
***　土木研究所河川部　都市河川研究室研究員（前システム課，現在併任）
****　近畿地方建設局道路部　計画調整課建設専門官（前システム課専門官）

目　　次

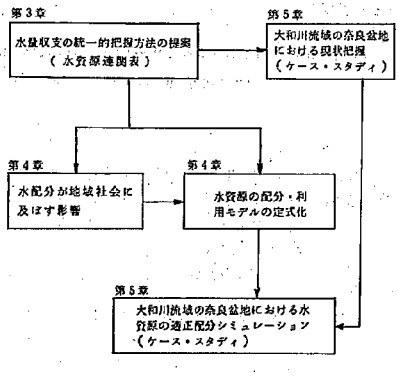
1. 序 …… 130
2. 従来の研究と本研究の基本的立場 …… 131
3. 水循環と水資源の配分・利用状況を統一的に表示する方法の提案 …… 131
〔1〕 流域構成要素とその特質 …… 131
〔2〕 水資源連関表 …… 132
〔3〕 水資源連関表による現状把握 …… 134
a) 分析対象期間 …… 134
b) 分析対象地域と地区分割 …… 134
4. 水資源の配分・利用のモデル化 …… 135
〔1〕 モデル作成の目的 …… 135
〔2〕 線形計画法による水資源の配分・利用のモデルの定式化 …… 135
a) 制約条件 …… 135
b) 目的関数 …… 139
5. 大和川流域の奈良盆地におけるケース・スタディ …… 139
〔1〕 流域構成要素 …… 139
〔2〕 地区分割 …… 140
〔3〕 水資源連関表による現状把握 …… 140
〔4〕 ケース・スタディにおける水資源の配分・利用モデルの基本構造 …… 140
〔5〕 分解原理による解法 …… 142
a) 分解原理の適用性 …… 143
b) 分解原理の構成 …… 143
〔6〕 計算結果および考察 …… 145
6. 結　論 …… 150
【付　録】ケース・スタディに関する補足
1. 記号説明 …… 151
2. 水資源連関表による現状把握 …… 152
3. 水配分モデルの詳細 …… 155
(a) 制約条件 …… 156
(b) 目的関数 …… 157
4. 入力データおよびパラメータ …… 158
参 考 文 献 …… 163

1　序

水資源をめぐる諸問題の深刻化は，新たな水資源の開発や，その配分・利用に対する種々の観点からの見直しなどを促じつつある。従来の水資源の配分・利用に関する計画は，ある限られた利水部門を対象にして立案されたものが多い。ところが，水は流域を流れ去る間に，家庭・工業・農業・業務といった利水部門や，河川・地下等の間で複雑にやりとりされる。したがって，限られた水資源を流域（地域）内で合理的に配分・利用するためには，少数の利水部門に対する配分計画では不十分であり，流域（地域）全体を包含するシステムを考える必要がある。また，水資源の配分を考慮する際には，水資源と地域社会の相互関係に留意すべきである。

水資源の配分・管理計画を立案する場合には，その前提として，流域内の水循環や水資源の配分現況が総合的に把握されている必要がある。そして，水資源の配分計画が実現されれば，現在の水配分状況がどのように変化し，それが地域社会にどのような影響を及ぼすかを推察することが重要である。ところが，総合的な状況把握はほとんどといってよい程なされておらず，そのための方法論も十分に研究されているとはいいがたい。そこで，本報告では，まず流域（地域）内の水収支を総合的に把握する方法を提案する。次に，この方法にもとづいて水資源の配分・利用モデルを定式化し，流域（地域）の水資源を総合的かつ経済・社会・環境等の多角的な観点から配分する方法を考察する。さらに，提案した水収支把握方法と水資源の配分・利用モデルを大和川流域の奈良盆地に適用し，ケース・スタディを行なった結果を報告する。

本論文の構成を図－1に示す。



図－1　本論文の構成

2　従来の研究と本研究の基本的立場

従来の水資源の配分・管理に関する研究は，ある限られた利水部門（例えば工業用水と上水，あるいは農業用水単独）を対象にして行なわれたものが多い。[1)~9)] 日本における水資源の配分に関する先駆的な研究としては，合田ら[1)]の研究がある。合田らは工業用水の最適配分問題を線形計画で取り扱い，問題を定式化する際に導入される諸係数が最適解に及ぼす影響などについて考察を行なっている。春名ら[6)]および吉川ら[7)]は，ダム開発水や三次処理水（再利用水）等の配分問題を同じく線形計画法で定式化し，最適解を求める際に分解原理を用いると，現象を理解する上で都合が良いとしている。また，吉川ら[8)]は目的関数や水質を厳密に考慮する際に生ずる非線形問題についても考察している。外国の研究においても，線形計画法で定式化を行なったものが最も多く，[2)~4) 10)] ネットワーク手法[1)]や動的計画法[5), 12)]を用いたものもある。

流域（地域）の水を総合的に管理するという観点から従来の水資源の配分・利用に関する研究をながめてみると，次のような問題点を挙げることができよう。

(i)　排水の問題などに関連した，流域（地域）内でくり返し利用される水（流域の水循環）の取り扱いが十分でない。

(ii)　家庭・工業・農業・河川・地下（水）等が複雑に絡み合って水配分ネットワークを構成しており，それらが互いに利害を及ぼし合っていることに関する考察が不足している。

(iii)　水資源と地域社会の相互関係を，経済・社会・環境等の多角的な観点から考慮した取り扱いが十分でない。

これらの問題を解明するためには，今までのように，ある限られた利水部門を対象とする取り扱いでは不十分であり，流域（地域）全体の総合的な水循環システムを考えることが重要である。すなわち，あらゆる利用水・排水及び自然水を含めた流域（地域）内の水収支を，総合的に取り扱う必要がある。また，水資源の配分計画を立案する際には，水資源が地域社会で果たす役割を十分に認識しておくことも重要である。

本論文では，上述のことを考慮して，流域（地域）内の水資源の配分問題を考察する方法を提示する。従来の研究においては，水資源の配分方法については多くの手法が提示されている。[1), 5), 8), 10), 12), 17)] しかし，あらゆる水資源問題の検討の前提となる，総合的な状況把握に対する方法論は，十分に開発されているとはいいがたい。そこで，まずその方法として一覧表（「水資源連関表」）による分析法を提案する。この水資源連関表は，経済学の分野で提案された地域間産業連関表と類似の構造をもつものである。この表では，水が流域（地域）内の各地区間と水資源に関連する要素間で複雑にやりとりされている状況が示される。これにより，流域における水循環と水資源の配分状況を総合的に把握しておくことが，水資源をめぐる諸問題の検討を行なう場合の基本的な前提である。

次に，水資源連関表にもとづいて，流域（地域）内の水資源の配分問題を定式化する。本研究でも，問題の性格，精度，解法の簡便さなどを考慮して，線形計画法を用いることにする。そして，線形化により生じる問題点は，ケース・スタディの際に感度分析等により明確にし，諸係数の設定には十分注意を払うことにする。なお，従来の研究と異なり，物理的な条件として，水の連続条件の外に運動に関する条件も考慮する。また，水資源と地域社会の関係は，各種の社会的制約を設定する際に考慮する。

以上で述べた方法を大和川流域に適用し，ケース・スタディを行なった。その内容は次のようなものである。

(i)　水資源連関表による水循環と水資源の配分現況の把握

(ii)　水資源の適正配分に関するシミュレーション

(iii)　(i), (ii)をもとにした水資源をめぐる諸問題の検討

(iv)　提案した理論の(i), (ii), (iii)をもとにした検討

本研究は，地表水，地下水および大気中の水も含めた流域（地域）内の水循環を取り扱っており，現状の水資源の配分・利用形態の見直しや，広域的な水管理などには有益であると考える。

3　水循環と水資源の配分・利用状況を統一的に表示する方法の提案

ここでは，流域（地域）における水循環と水資源の配分・利用状況を統一的に表示する方法を提案する。

(1)　流域構成要素とその特質

水資源の配分・利用には，河川・上水道・下水道・家庭・工業等の特質の異なる要素が関連している。各要素は，水を輸送する機能，利用する機能，降水を受水する機能，蒸発散を行なう機能，水質を浄化する機能，汚濁負荷を発生させる機能等の諸機能のうち一つまたは複数をそなえている。これらの要素を「流域構成要素」とよび，ここでは河川・地下・上水道・家庭・業務・工業・農業・下水道・母水・流域の10要素をとりあげる。それぞれの要素がもつ機能を，表－1のようにとらえることにする。

表－1　流域構成要素とその特質

流域構成要素	概要	地区間水輸送機能をもつ要素	水利用要素	降水受水機能をもつ要素	蒸発散機能をもつ要素	水質浄化機能をもつ要素	汚濁負荷発生機能をもつ要素
河川	湖沼を含む	○		○*2	○*2	○*3	
地下	深層および浅層地下水帯	○				○*3	
上水道	取水・導水・浄化・配水の各施設	○				○	
家庭	住宅		○		○	○*4	○
業務	主として第3次産業による業務地区		○		○	○*4	○
工業	工場		○		○	○*4	○
農業	水田・畑地および用排水施設	○	○	○	○	○	○
下水道	下水道管路網と処理施設	○				○	
導水*1	他地域からの導水施設	○				○*3	
流域	農地以外の地表面			○	○	○*3	○

*1　「導水」要素は「上水道」要素または「農業」要素に含めて考えてもよい。
*2　全面積に比して河川・湖沼の面積が小さい場合には無視してもよい。
*3　自浄作用
*4　当該要素内で循環再利用を行なう場合には処理機能が必要となる。

対象流域(地域)内の水は，これら10要素のどれかに必ず含まれる。地区内における水のやりとりは，これら10要素相互間で行なわれ，地区間のやりとりは，河川・地下・上水道・農業(用排水施設)・下水道・導水の水輸送機能をもつ諸要素を介して行なわれる。降水や蒸発散等の系外との水の受けわたしは，降水受水機能をもつ要素および蒸発散機能をもつ要素を介して行なわれることになる。

なお，この流域構成要素をさらに細かくあるいは大まかに分類することはもちろん可能であり，以下の議論はそのような場合についても全く同様に適用される。

〔2〕 水資源連関表

流域(地域)内の水は，各要素間・各地区間で，様々な形態でやりとりされている。このような水のやりとりを表示する方法として，表－2に示すような一覧表(「水資源連関表」)を提案する。これは，前述のように概念的には地域間産業連関分析表と似ており，左端にどの地区のどの要素から水が流入してくるのか，上端にどの地区のどの要素へ流れて行くのかを示している。したがって，表－2におけるAの部分は，地区1の内部における各要素間の水の受けわたし量を示している。また，Bの部分は地区1から地区2へ輸送される水量を示し，Cの部分は地区1から系外への水量，すなわち，対象としている地域外への流出および空中へ蒸発散する量を示している。一方，Dの部分は地区2から地区1へ輸送される水量を示し，Gの部分は系外から地区1への水量，すなわち分析の対象としている地域外からの流入量および降水量を示している。

水の受けわたしは，水資源連関表の全マス目で生じるわけではなく，その可能性のあるマス目は限定されている。表－2では，後述するケース・スタディで水の受けわたしがないと考えられるマス目を黒く塗りつぶした。同図よりわかるように，A，E，…… の対角部分は同様のパターンで塗りつぶされ，B，D，…… の部分は水輸送機能をもつ要素のみが値をもつ可能性がある。

後の理論展開の便宜のために，次のように記号を定める。

x_{ij}^{rs} ；r 地区の i 要素から s 地区の j 要素への水輸送量を示す。例えば，x_{ij}^{rr} は r 地区内で i 要素から j 要素にわたされる（排水・浸透・湧水・給水等）水量である。

g_i^r ；r 地区から i なる輸送要素を介して，分析しようとしている地域の外へ輸送（導水・送水・流下等）される水量

f_i^r ；r 地区の i 要素から蒸発散する水量

x_{i*}^{r*} ；r 地区の i 要素から他地区，対象地域の外および空中へ移動する水量の合計（r 地区内への移動は除く）

X_{i*}^{r*} ；r 地区の i 要素を介して移動する水量の合計

表－2 水資源連関表

流入＼流出		地区1 河川	地区1 地下水	地区1 上水道	地区1 家庭	地区1 業務	地区1 工業	地区1 農業	地区1 下水道	地区1 導水	地区1 流域	地区2 河川	地区2 地下水	地区2 上水道	地区2 家庭	地区2 業務	地区2 工業	地区2 農業	地区2 下水道	地区2 導水	地区2 流域		系外 地域外	系外 蒸発散	当該地区以外計	計
地区1	河川			x^{11}_{13}			x^{11}_{16}	x^{11}_{17}				x^{12}_{11}										----	g^{1}_{1}	f^{1}_{1}	$x^{1*}_{1\cdot}$	$X^{1\cdot}_{1\cdot}$
	地下水	x^{11}_{21}		x^{11}_{23}	x^{11}_{24}	x^{11}_{25}	x^{11}_{26}	x^{11}_{27}					x^{12}_{22}									----	g^{1}_{2}		$x^{1*}_{2\cdot}$	$X^{1\cdot}_{2\cdot}$
	上水道		x^{11}_{32}		x^{11}_{34}	x^{11}_{35}	x^{11}_{36}							x^{12}_{33}								--	g^{1}_{3}		$x^{1*}_{3\cdot}$	$X^{1\cdot}_{3\cdot}$
	家庭				x^{11}_{44}				x^{11}_{48}		$x^{22}_{4\cdot10}$											-		f^{1}_{4}	$x^{1*}_{4\cdot}$	$X^{1\cdot}_{4\cdot}$
	業務					x^{11}_{55}			x^{11}_{58}		$x^{22}_{5\cdot10}$											--		f^{1}_{5}	$x^{1*}_{5\cdot}$	$X^{1\cdot}_{5\cdot}$
	工業						x^{11}_{66}		x^{11}_{68}		$x^{22}_{6\cdot10}$											--		f^{1}_{6}	$x^{1*}_{6\cdot}$	$X^{1\cdot}_{6\cdot}$
	農業	x^{11}_{71}	x^{11}_{72}															x^{12}_{77}				. .	g^{1}_{7}	f^{1}_{7}	$x^{1*}_{7\cdot}$	$X^{1\cdot}_{7\cdot}$
	下水道	x^{11}_{81}		x^{11}_{83}	x^{11}_{84}	x^{1}_{85}	x^{11}_{86}	x^{11}_{87}											x^{12}_{88}			--	g^{1}_{8}		$x^{1*}_{8\cdot}$	$X^{1\cdot}_{8\cdot}$
	導水			x^{11}_{93}			x^{11}_{96}	x^{11}_{97}												x^{12}_{99}		----	g^{1}_{9}		$x^{1*}_{9\cdot}$	$X^{1\cdot}_{9\cdot}$
	流域	$x^{11}_{10\cdot1}$	$x^{11}_{10\cdot2}$						$x^{11}_{10\cdot8}$													----		f^{1}_{10}	$x^{1*}_{10\cdot}$	$X^{1\cdot}_{10\cdot}$
地区2	河川	x^{21}_{11}												x^{22}_{13}			x^{22}_{16}	x^{22}_{17}				----	g^{2}_{1}	f^{2}_{1}	$x^{2*}_{1\cdot}$	$X^{2\cdot}_{1\cdot}$
	地下水		x^{21}_{22}									x^{22}_{21}		x^{22}_{23}	x^{22}_{24}	x^{22}_{25}	x^{22}_{26}	x^{22}_{27}				----	g^{2}_{2}		$x^{2*}_{2\cdot}$	$X^{2\cdot}_{2\cdot}$
	上水道			x^{21}_{33}									x^{22}_{33}		x^{22}_{34}	x^{22}_{35}	x^{22}_{36}					----	g^{2}_{3}		$x^{2*}_{3\cdot}$	$X^{2\cdot}_{3\cdot}$
	家庭														x^{22}_{44}				x^{22}_{48}		$x^{22}_{4\cdot10}$	----		f^{2}_{4}	$x^{2*}_{4\cdot}$	$X^{2\cdot}_{4\cdot}$
	業務															x^{22}_{55}			x^{22}_{58}		$x^{22}_{5\cdot10}$	----		f^{2}_{5}	$x^{2*}_{5\cdot}$	$X^{2\cdot}_{5\cdot}$
	工業																x^{22}_{66}		x^{22}_{68}		$x^{22}_{6\cdot10}$	----		f^{2}_{6}	$x^{2*}_{6\cdot}$	$X^{2\cdot}_{6\cdot}$
	農業							x^{21}_{77}				x^{22}_{71}	x^{22}_{72}									----	g^{2}_{7}	f^{2}_{7}	$x^{2*}_{7\cdot}$	$X^{2\cdot}_{7\cdot}$
	下水道								x^{21}_{88}			x^{22}_{81}		x^{22}_{83}	x^{22}_{84}	x^{22}_{85}	x^{22}_{86}	x^{22}_{87}				----	g^{2}_{8}		$x^{2*}_{8\cdot}$	$X^{2\cdot}_{8\cdot}$
	導水									x^{21}_{99}				x^{22}_{93}			x^{22}_{96}	x^{22}_{97}				----	g^{2}_{9}		$x^{2*}_{9\cdot}$	$X^{2\cdot}_{9\cdot}$
	流域											$x^{22}_{10\cdot1}$	$x^{22}_{10\cdot2}$						$x^{22}_{10\cdot8}$			----		f^{2}_{10}	$x^{2*}_{10\cdot}$	$X^{2\cdot}_{10\cdot}$
	- - -																									
系外	地域外	v^{1}_{1}	v^{1}_{2}	v^{1}_{3}				v^{1}_{7}	v^{1}_{8}	v^{1}_{9}		v^{2}_{1}	v^{2}_{2}	v^{2}_{3}				v^{2}_{7}	v^{2}_{8}	v^{2}_{9}						V
	降水	w^{1}_{1}						w^{1}_{7}			w^{1}_{10}	w^{2}_{1}						w^{2}_{7}			w^{2}_{10}					U
当該地区以外計		$x^{*1}_{\cdot1}$	$x^{*1}_{\cdot2}$	$x^{*1}_{\cdot3}$	$x^{*1}_{\cdot4}$	$x^{*1}_{\cdot5}$	$x^{*1}_{\cdot6}$	$x^{*1}_{\cdot7}$	$x^{*1}_{\cdot8}$	$x^{*1}_{\cdot9}$	$x^{*1}_{\cdot10}$	$x^{*2}_{\cdot1}$	$x^{*2}_{\cdot2}$	$x^{*2}_{\cdot3}$	$x^{*2}_{\cdot4}$	$x^{*2}_{\cdot5}$	$x^{*2}_{\cdot6}$	$x^{*2}_{\cdot7}$	$x^{*2}_{\cdot8}$	$x^{*2}_{\cdot9}$	$x^{*2}_{\cdot10}$					
計		$X^{\cdot1}_{\cdot1}$	$X^{\cdot1}_{\cdot2}$	$X^{\cdot1}_{\cdot3}$	$X^{\cdot1}_{\cdot4}$	$X^{\cdot1}_{\cdot5}$	$X^{\cdot1}_{\cdot6}$	$X^{\cdot1}_{\cdot7}$	$X^{\cdot1}_{\cdot8}$	$X^{\cdot1}_{\cdot9}$	$X^{\cdot1}_{\cdot10}$	$X^{\cdot2}_{\cdot1}$	$X^{\cdot2}_{\cdot2}$	$X^{\cdot2}_{\cdot3}$	$X^{\cdot2}_{\cdot4}$	$X^{\cdot2}_{\cdot5}$	$X^{\cdot2}_{\cdot6}$	$X^{\cdot2}_{\cdot7}$	$X^{\cdot2}_{\cdot8}$	$X^{\cdot2}_{\cdot9}$	$X^{\cdot2}_{\cdot10}$		G	F		$X^{\cdot\cdot}_{\cdot\cdot}$

v_j^s ；対象地域の外部から，j なる輸送要素を介して s 地区に輸送（導水・送水・流下）される水量

u_j^s ；s 地区の j 要素に降水として入ってくる水量

x_{*j}^{*s} ；他地区，対象地域外および大気中から s 地区 j 要素へ移動してくる水量の合計（s 地区内からの移動を除く）

X_{*j}^{*s} ；s 地区の j 要素に入ってくる水量の合計

V ；対象地域外から対象地域内に入ってくる水量の合計

U ；降水として対象地域内へ入ってくる水量の合計

G ；対象地域から地域外へ出る水量の合計

F ；対象地域から蒸発散する水量の合計

このように記号を定めると，次の関係式が成立する。

$$x_{*i}^{r*} = \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq r}}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_{ij}^{rs} + g_i^r + f_i^r \quad \cdots\cdots (1)$$

$$X_{*i}^{r*} = \sum_{s=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_{ij}^{rs} + g_i^r + f_i^r \quad \cdots\cdots (2)$$

$$x_{*j}^{*s} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq s}}^{n} \sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{rs} + v_j^s + u_j^s \quad \cdots\cdots (3)$$

$$X_{*j}^{*s} = \sum_{r=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{rs} + v_j^s + u_j^s \quad \cdots\cdots (4)$$

$$V = \sum_{s=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} v_j^s \quad \cdots\cdots (5)$$

$$U = \sum_{s=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} u_j^s \quad \cdots\cdots (6)$$

$$G = \sum_{r=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} g_i^r \quad \cdots\cdots (7)$$

$$F = \sum_{r=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} f_i^r \quad \cdots\cdots (8)$$

ここに，n；対象地域内の地区数，m；流域構成要素数である。

なお，流域構成要素内の貯留量の変化が問題となるような場合には，水資源連関表を拡張して用いる必要があり，それについては次の機会に報告したい。*

〔3〕 水資源連関表による現状把握

水資源連関表を用いて，流域(地域)内の水循環や水資源の配分・利用現況を把握しようとすれば，流域構成要素の外に，次の二つの事項を決定しておく必要がある。一つは分析対象期間の決定であり，あと一つは分析対象地域とその内部の地区割りである。

a）分析対象期間

分析対象期間の決定は，後述する現状把握や適正水配分シミュレーションなどにおいて，重要な意味をもってくる。分析対象期間を長くとれば，水量に関する連続条件および水の運動（蒸発散・地下水の湧出・浸透等）に関する条件を単純な形で与えることができる。たとえば，水量の連続条件式は，分析対象期間が長くなれば貯留量の変化が相殺されるので**，流入量と流出量が等しいとおいてよい。すなわち，t 地区の k 要素について

$$\sum_{s=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_{kj}^{ts} + g_k^t + f_k^t = \sum_{r=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} x_{ik}^{rt} + v_k^t + u_k^t \quad \cdots\cdots (9)$$

$$i.e\ X_{k*}^{t*} = X_{*k}^{*t} \quad \cdots\cdots (10)$$

なる関係式が成立する。また，運動を表わす式は，蒸発散率・湧出率・浸透率・河川の分流比等を用いて与えることができよう。このように，分析対象期間を長くとれば，長期間にわたるトータル量を取り扱うことになり，後述する分析操作が単純化される。もちろん，これにより分析結果の利用範囲が限定されることはいうまでもない。たとえば，渇水期における水配分計画においては，貯留量の変化は一つの考察対象であり，上述のような取り扱いをするわけにはいかない。ところが，例えば1年間といった分析対象期間をとれば，連続条件および運動に関する条件を単純な形で与えることが可能であろう。ただし，揚水量が流入量に比べて大きい地下水層を含む地域においては貯留量の変化を考慮する必要がある。

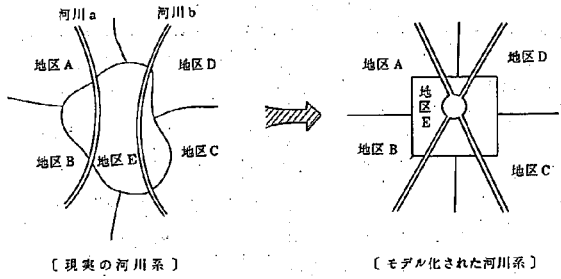
b）分析対象地域と地区分割

分析対象地域の設定においては，その地域への流出入量が把握しやすいような境界を選ぶ必要がある。通常の場合には，水文界によって区切るのが適切であろう。

対象地域内の地区分割にあたっては，いくつかの点に留意する必要がある。一つはデータのとりやすさである。上・下水道関係資料は行政区画によって収集されているものが多いが，河川関係資料は水文界によって収集されている場合が多く，資料収集上都合のよい地区分割を行なう必要がある。また，1地区の中に特性の異なる複数の河川が含まれる場合には，困難な問題が生じる。水資源連関表では，1地区内の河川は1個のものとして取り扱う（集中系として扱う）ことから，たとえば水質の非常に異なる2本の河川が，合流

* ここでいう貯留量としては，ある基準値からの差をとればよい。

** 参考文献 (21) P67



図－2　水資源連関表での河川の取り扱い

することなくその地区を通って流下するような場合には，その下流における水質解析は無意味となる（図－2参照）。そのような場合には，河川を分離するように地区割りをすることが望ましい。複数河川を含む地区を考える場合には，水質および流況の似た場所を統合すべきである。

実際の分析にあたっては，以上のことがらに注意しながら，分析の目的に対して都合のよい地区分割を行なうことになる。

以上のような特徴をもつ水資源連関表を用いて，流域内で複雑にやりとりされる水の有機的な結びつきを把握しておくことは，流域における水問題を検討する上で重要であると考える。

4　水資源の配分・利用のモデル化

(1) モデル作成の目的

以下で述べる水資源の配分・利用モデル作成の目的は次のようなものである。

(i) 水資源の利用に関連してわれわれが望む事柄は多種多様である。これら種々の要求に照らして，適正な水資源の配分計画を探し出すことがモデル作成の第一の目的である。

(ii) 水資源の配分計画案の作成にあたっては，物理的に実現可能であること，また社会・財政・環境等の面からもそれが受け入れられることが必須の要件である。以下に述べるモデルにより得られる解は，数多くの実現可能解のうち，ある観点からみた最適性が保証されているにすぎない。多角的な観点から水資源計画の検討を行なうためには，どのような領域（範囲）の計画案が実現可能であるかを把握することが重要であり，これがモデル作成の第二の目的である。

(iii) われわれが記述（シミュレーション）できるのは，現実の世界を何らかの形で抽象化して把握したものでしかない。したがって，われわれが記述したものが，現実の世界をうまく説明できるか否かを検証することは極めて重要である。同時に，計画案やモデルを少し変更させた場合に，どのような結果が得られるかを把握しておくことも重要である。種々のパラメータや制約条件の変更に伴う感度分析はこの一例であり，得られた結果の信頼性と安定性の把握はモデル作成の第三の目的である。

(2) 線形計画法による水資源の配分・利用モデルの定式化

ここでは，流域(地域)における水資源の配分・利用問題を，水資源連関表に示される水のやりとり量を変数として，線形計画法で定式化する。

前述のように，適正水配分計画とは，物理・社会・経済・環境等の面からの要求をすべて満たした上で，実現可能な計画が考えられる場合に，ある観点からみた最適性が保証されているものである。したがって，適正水配分計画を論じる場合には，必ず満たしていなければならない制約が正しく記述されている必要がある。以下では，分析対象期間を1年程度の長期にとって，各種制約条件と目的関数について考察を進める。

a) 制約条件

制約条件には大別して2種類のものがある。1つは物理的な条件であり，必ず満たされなければならないものである。あと1つは社会的な制約条件であり，前者に比べて融通のきくものもある。後者は不等式で表わされるものが多い。

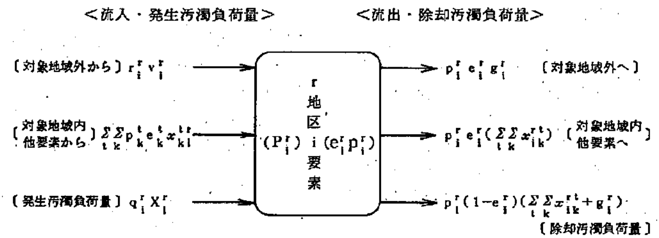
(i) 物理的な制約条件

① 水量の連続条件

この条件は線形であり，t 地区 k 要素について(9)式あるいは(10)式で与えられる。

表－3 水の運動に関する条件

始端	末端要素	運動に関する条件式	αの意味	始端	末端要素	運動に関する条件式	αの意味
河川	他地区の河川 $(s\neq r)$	$x_{11}^{rs}=\alpha_{11}^{rs}\cdot x_{1\cdot}^{r*}$	分流比	家庭	蒸発散	$f_4^r=\alpha_{4\cdot}^{rf}\cdot X_{4\cdot}^{r\cdot}$	家庭の蒸発散率
	地域外の河川	$g_1^r=\alpha_{1\cdot}^{rg}\cdot x_{1\cdot}^{r*}$	分流比	業務	蒸発散	$f_5^r=\alpha_{5\cdot}^{rf}\cdot X_{5\cdot}^{r\cdot}$	業務の蒸発散率
	蒸発散	$f_1^r=\alpha_{1\cdot}^{rf}\cdot x_{1\cdot}^{r*}$	河川からの蒸発散率	工業	蒸発散	$f_6^r=\alpha_{6\cdot}^{rf}\cdot X_{6\cdot}^{r\cdot}$	工業の蒸発散率
ただし, $\sum_{s=1\,(s\neq r)}^{n}\alpha_{11}^{rs}+\alpha_{1\cdot}^{rg}+\alpha_{1\cdot}^{rf}=1$				農業	地区内地下水	$x_{72}^{rr}=\alpha_{72}^{rr}\cdot X_{7\cdot}^{r\cdot}$	地下浸透率
地下水	地区内の河川	$x_{21}^{rr}=\alpha_{21}^{rr}\cdot(X_{2\cdot}^{r\cdot}-\sum_{j=3}^{7}x_{j2}^{rr})$	地下水湧出率		蒸発散	$f_7^r=\alpha_{7\cdot}^{rf}\cdot X_{7\cdot}^{r\cdot}$	農業の蒸発散率
	他地区の地下水 $(s\neq r)$	$x_{22}^{rs}=\alpha_{22}^{rs}\cdot(X_{2\cdot}^{r\cdot}-\sum_{j=3}^{7}x_{j2}^{rr})$	他地区浸透率	流域	地区内の河川	$x_{10\,1}^{rr}=\alpha_{10\,1}^{rr}\cdot(X_{10\cdot}^{r\cdot}-x_{10\,8}^{rr})$	直接流出率
	地域外地下水	$g_2^r=\alpha_{2\cdot}^{rg}\cdot(X_{2\cdot}^{r\cdot}-\sum_{j=3}^{7}x_{j2}^{rr})$	地域外浸透率		地区内地下水	$x_{10\,2}^{rr}=\alpha_{10\,2}^{rr}\cdot(X_{10\cdot}^{r\cdot}-x_{10\,8}^{rr})$	地下浸透率
ただし, $\alpha_{21}^{rr}+\sum_{s=1\,(s\neq r)}^{n}\alpha_{22}^{rs}+\alpha_{2\cdot}^{rg}=1$					蒸発散	$f_{10}^r=\alpha_{10\cdot}^{rf}\cdot(X_{10\cdot}^{r\cdot}-x_{10\,8}^{rr})$	流域蒸発散率
上水道	地区内の地下水	$x_{32}^{rr}=\alpha_{32}^{rr}\cdot X_{3\cdot}^{r\cdot}$	漏水率	ただし, $\alpha_{10\,1}^{rr}+\alpha_{10\,2}^{rr}+\alpha_{10\cdot}^{rf}=1$			



図－3 r 地区 i 要素の汚濁負荷の収支

② 運動に関する条件

この条件は一般に線形ではない。しかし，線形計画法により問題を定式化するために，ここでは表－3に示すように線形化した運動に関する条件式を考える。

③ 汚濁負荷量の連続式

r 地区 i 要素における汚濁負荷量の収支を考える（図－3参照)。r 地区 i 要素に流入し，利用された直後の水質（汚濁負荷濃度）を p_i^r とすると，これは対象地域外からと対象地域内の他の要素からの汚濁量，および発生汚濁負荷量に支配される。発生汚濁負荷量が使用水量に比例すると仮定すれば，水質の浄化作用を考慮した汚濁負荷の連続式は次のように表わされる。

$$r_i^r v_i^r+\sum_t\sum_k p_k^t e_k^t x_{ki}^{tr}+q_i^r X_{i\cdot}^{r\cdot}$$

$$=p_i^r e_i^r g_i^r+p_i^r e_i^r(\sum_t\sum_k x_{ik}^{rt})+p_i^r(1-e_i^r)$$

$$(\sum_t\sum_k x_{ik}^{rt}+g_i^r)=p_i^r(x_{i\cdot}^{r\cdot}-f_i^r)\cdots\cdots(11)$$

ここに，r_i^r；対象地域外からの流入水の水質，q_i^r；発生汚濁負荷濃度，e_i^r；汚濁負荷流達率（流出汚濁負荷量を流入・発生汚濁負荷量の和で割った値と定義する）。ただし，降水および蒸発散水の水質（汚濁負荷濃度）は0と考えてよいものとする。

このような式は $n\times m$ 個あり，水質 p_i^r は，水資源連関表の各値 x_{ij}^{rs}・v_i^r・g_i^r・$X_{i\cdot}^{r\cdot}$ 対象地域外からの流入水質 r_i^r，汚濁負荷流達率 e_i^r および発生汚濁負荷濃度 q_i^r が与えられると，これらの連立方程式の解として求められる。これを行列表示すると，

$$\mathbf{p}=(\mathbf{X}-\mathbf{f}-{}^t\mathbf{xe})^{-1}(\mathbf{vr}+\mathbf{Xq})\cdots\cdots\cdots(12)$$

となる。ここに，

$$\mathbf{x}=\begin{pmatrix} x_{11}^{1} & x_{12}^{1} & \cdots\cdots & x_{11}^{2} & x_{12}^{2} & \cdots\cdots \\ x_{21}^{1} & x_{22}^{1} & \cdots\cdots & & & \\ \vdots & & & & & \\ x_{11}^{21} & & & & & \\ \vdots & & & & & \end{pmatrix} \qquad \mathbf{v}=\begin{pmatrix} v_1^1 & & & & \\ & v_2^1 & & 0 & \\ & & \ddots & & \\ & & & v_1^2 & \\ & 0 & & & v_2^2 \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix} \qquad \mathbf{g}=\begin{pmatrix} g_1^1 & & & & \\ & g_2^1 & & 0 & \\ & & \ddots & & \\ & & & g_1^2 & \\ & 0 & & & g_2^2 \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{X}=\begin{pmatrix} \mathbf{X}_1^1: & & & \\ & \mathbf{X}_2^1: & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{X}_1^2: \\ & 0 & & & \mathbf{X}_2^2: \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix} \qquad \mathbf{f}=\begin{pmatrix} f_1^1 & & & & \\ & f_2^1 & & 0 & \\ & & \ddots & & \\ & & & f_1^2 & \\ & 0 & & & f_2^2 \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix} \qquad \mathbf{e}=\begin{pmatrix} e_1^1 & & & & \\ & e_2^1 & & 0 & \\ & & \ddots & & \\ & & & e_1^2 & \\ & 0 & & & e_2^2 \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{q}=\begin{pmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ \vdots \\ q_1^2 \\ q_2^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \qquad \mathbf{r}=\begin{pmatrix} r_1^1 \\ r_2^1 \\ \vdots \\ r_1^2 \\ r_2^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \qquad \mathbf{p}=\begin{pmatrix} p_1^1 \\ p_2^1 \\ \vdots \\ p_1^2 \\ p_2^2 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

である。

(II) 社会的な制約条件

社会的な制約条件は，社会の進展とともに変化することが考えられるが，ここでは現状を考慮して，社会的に要請される制約を例示的に考察する。

① 水質の制約

各要素の水質は上記(12)式によって求まるが，特に河川水質のみを問題にする場合には，次の制約条件式を考えればよい。

$$p_1^r \leqq \bar{p}_1^r \ (r=1, \cdots\cdots, n) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (13)$$

ここに，$\bar{p}_1^r$；河川水の質基準値である。

(12)式からわかるように，水質を厳密に考慮しようとすれば，非線形の問題を解く必要がある。本研究では，全体的な精度のバランスと実用性を考え，最適化計算においては，①最適計算においては水質制約を除外し，結果が制約を満しているかをチェックする方法，* ②(12)式の河川に関する式を線形近似する方法について検討した。②の方法を用いる場合の詳細については，付録（後記）および参考文献(24)を参照されたい。

② 再利用水に関する制約

工業・家庭・業務の内部において循環再利用に回しうる水量は，技術的な制約等から全使用水量のうち一部に限定される。z_jを循環再利用率の上限とすれば，

$$x_{jj}^{rr} / (x_{1j}^{rr}+x_{2j}^{rr}+x_{3j}^{rr}+x_{jj}^{rr}+x_{8j}^{rr}) \leqq z_j \cdots (14)$$

$$(j=4, 5, 6;\ r=1, \cdots\cdots, n)$$

となる。また，再生水の使用には制限があることが多い。g_jを全使用水に対する再生利用水率の上限とすれば，次式を得る。

$$(x_{jj}^{rr}+x_{8j}^{rr})/(x_{1j}^{rr}+x_{2j}^{rr}+x_{3j}^{rr}+x_{jj}^{rr}+x_{8j}^{rr}) \leqq g_j \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

$$(g=4, 5, 6;\ r=1, \cdots\cdots, n)$$

③ 地下水取水量に関する制約

地盤沈下や地下水保全の観点から，地下水取水量は制限されることがある。

$$x_{2i}^{rr} \leqq \bar{x}_{2i}^{rr} \text{ または } \sum_{i=3}^{7} x_{2i}^{rr} \leqq \bar{x}_{2}^{rr} \cdots\cdots\cdots (16)$$

$$(i=3, 4, 5, 6, 7;\ r=1, \cdots\cdots, n)$$

ここに$\bar{x}_{2i}^{rr}$および$\bar{x}_{2}^{rr}$は，それぞれ各地区の各要素および各地区全体に対して定められた，許容地下水取水量である。

④ 水資源から見た収容可能人口

r地区の収容（可能）人口は，地域計画等によりある人数$\bar{p}^r$以上であることが要求されることが多い。

* 満してなければ，各種制約条件等の変更を行ない，水質制約を満たすような配分形態を求める。

$$p^r = X^{*r}_{*4} / d^r_4 \geqq \bar{p}^r \quad \cdots\cdots (17)$$

ここに，d^r_4；1人当りの使用水量である。

⑤　水資源から見た生産可能高

r地区における工業・農業・業務の生産（可能）高も，ある一定額以上を求められることが多い。i産業において一単位の生産を行うのに必要な水量をd^r_iとすれば，次の制約条件式を得る。

$$o^r_i = X^{*r}_{*i} / d^r_i \geqq \bar{o}^r_i \quad \cdots\cdots (18)$$

$$(i=5,\ 6,\ 7\ ;\ r=1, \cdots\cdots, n)$$

ここに$\bar{o}^r_i$は必要生産額である。

⑥　利水施設により定まる河川取水可能量の上限

ダム等の利水施設の状態により，河川から取水しうる水量の上限が決定される。これは，洪水時等に利用されることなく流域を通過する水量を除いた利用可能水量の上限を示す式であり，物理的な制約と考えてもよい。

$$x^{rr}_{13} + x^{rr}_{16} + x^{rr}_{17} \leqq \bar{S}^r_1 \quad \cdots\cdots (19)$$

ここに，$\bar{S}^r_1$は河川からの取水可能量の上限値である。

⑦　維持流量

河川流量は，環境保全等の面からある一定量（$\bar{x}^{rs}_{11}$および$\bar{g}^r_1$）を超えることが望まれている。

$$x^{rs}_{11} \geqq \bar{x}^{rs}_{11} \text{ および } g^r_1 \geqq \bar{g}^r_1 \quad \cdots\cdots (20)$$

$$(r,\ S=1, \cdots\cdots, n \text{ ただし} r \neq S)$$

なお，後述の水配分シミュレーションの際には，x^{rs}_{11}および$\bar{g}^r_1$としては，通常の維持流量に洪水時に利用されることなく流れ去る水量を加えたものを与えることになる。その理由は，1年間のトータル量を取り扱うことによる。

⑧　建設費および運営費

利水施設の建設に伴い支出されるべき建設費は，水輸送量の増分と，それを一単位増加させるために必要な建設費用との積として表わされるものとする。また，運営費は，各要素間の水輸送量（とくに送水量・浄水量等）と一単位の水を輸送（送水・浄水）するのに必要な費用との積で表わすことにすると，地区rの総運営費C^rは

$$C^r = \sum_s \sum_i \sum_j C^{rs}_{ij} x^{rs}_{ij} + \sum_i C^{r0}_{i0} g^r_i + \sum_i C^{0r}_{0i} v^r_i \quad (21)$$

と書くことができる。ここに，C^{rs}_{ij}（C^{r0}_{i0}，C^{0r}_{0i}）；r（r，0）地区i（i，0）要素からs（0，r）地区j（0，i）要素へ単位水量を輸送（取水・浄水を含む）するのに必要とされる費用である。ただし，0は対象地域外を示す。

r地区の利水施設建設費（減価償却費）をM^rとすれば，費用に関する制約条件式は次のようになる。*

$$C^r \leqq \bar{C}^r \ and\ M^r \leqq \bar{M}^r \quad \cdots\cdots (22)$$

または

$$\sum_{r=1}^{n} C^r \leqq \bar{C}\ and \sum_{r=1}^{n} M^r \leqq \bar{M} \quad \cdots\cdots (23)$$

ここに，$\bar{C}^r$，$\bar{M}^r$，$\bar{C}$，$\bar{M}$は，各地区または対象地域について定められる投資可能限度額である。

なお，主として現在の施設のもとで水配分形態を見直す場合には，相対的に運営費の占める割合が大きくなり，(21)式のみを用いることも考えられる。

また，建設費と運営費と一緒にして考える場合には，次のような取り扱いも可能である。

$$\mathbf{C}^r \leqq \sum_s \sum_i \sum_j \mathbf{C}^{rs}_{ij} x^{rs}_{ij} + \sum_i \mathbf{C}^{r0}_{i\cdot} g^r_i + \sum_i \mathbf{C}^{0r}_{\cdot i} v^r_i \quad \cdots (24)$$

$$\mathbf{C}^r \leqq \bar{\mathbf{C}}^r \ or \sum_{r=1}^{n} \mathbf{C}^r \leqq \bar{\mathbf{C}} \quad \cdots\cdots (25)$$

ここに，係数$\mathbf{C}^{rs}_{ij}$，$\mathbf{C}^{r0}_{i\cdot}$，$\mathbf{C}^{0r}_{\cdot i}$は，建設費に減価償却係数を乗じた減価償却費と運営費の和として，それぞれx^{rs}_{ij}，g^r_i，v^r_iの単位水量に対して定められる費用係数である。$\bar{\mathbf{C}}^r$および$\bar{\mathbf{C}}$は，各地区および対象地域全体について定められる，減価償却費と運営費を含めた投資可能限度額である。

⑨　供給水量比

家庭・工業・業務・農業への供給水量比を定めることにより，これら相互の均衡を保つこともできる。**

$$X^{*r}_{*i} = \beta^r_i \left(\sum_{k=4}^{7} X^{*r}_{*k} \right) \quad (r=1, \cdots\cdots, n;\ i=4, \cdots\cdots, 7) \quad \cdots\cdots (26)$$

ただし，$\sum_{i=4}^{7} \beta^r_i = 1$である。

⑩　そ　の　他

その他の制約も，必要に応じて考慮する必要があり，線形表示されてモデルに組みこまれる。

以上で例示的に考察した社会的制約条件のうち，①・③・⑦は環境面，④・⑤は需要面，⑧は財政面，②・⑥は技術および施設面，⑨は制度面から主として要請されるものである。

線形計画法においては，制約条件が非線形のものについては，何らかの方法で線形化する必要がある。

---

*　建設費の算定は(21)式と同様にして行ない，減価償却費を水のやりとり量と関係づける。その場合の各係数は，建設費の減価償却費を水のやりとり量に対してわりふった費用として定義される。

**　制度的な問題がある場合については，均衡を保つよりも，各々の要素の使用水量の上下限値を与える方が適当であることも多い。

この線形化が解に及ぼす影響を把握しておくことは重要であり，諸係数の設定には工夫をこらし，感度分析等によりそれらの変化が解に及ぼす影響を明確にしておくことが望ましい。

b) 目的関数

ここで扱うような計画の問題では，変数の数に比べて制約条件式の数が少ない。制約条件式を用いていえることは，すべての制約を満たす解が存在するか否か，存在するとすればどの範囲であるかということである。仮にこれらを満たす解があったとしても，各変数の値を決めることはできない。ここでいう目的関数は，すべての制約を満たす計画案のうち，何らかの目的を決めることにより，その目的を最も満たすものを採用する（それとともに各変数の値は決定される）ために用いられる。

目的関数としては種々のものが考えられる。

① 建設費および運営費を最小にする。

$$min\left\{\sum_{r=1}^{n}(C^r+M^r)\right\}\ or\ min\left\{\sum_{r=1}^{n}C^r\right\}\cdots(27)$$

② 水資源からみた対象地域への収容可能人口を最大にする。

$$max\sum_{r=1}^{n}p^r\cdots\cdots(28)$$

③ 水資源からみた対象地域における生産可能高を最大にする。

$$max\sum_{r=1}^{n}o_i^r\ (i=5,6,7)\cdots\cdots(29)$$

④ ウェイトづけした目的関数を最大にする。

$$max\left[w_1\cdot\left(\sum_{r=1}^{n}p^r\right)+w_2\cdot\left(\sum_{r=1}^{n}o_i^r\right)-w_3\cdot\left\{\sum_{r=1}^{n}(C^r+M^r)\right\}\right]\cdots\cdots(30)$$

⑤ その他

その他，目的に応じて関数（線形表示された関数）が設定される。

線形計画モデルの目的関数としては，分析目的に応じてこれらの中から適切なものを一つ選ぶことになる。

なお，目的関数③のように，多目的に対して適正な水配分を考える場合には，トレード・オフの関係にある各々の目的の達成水準を考慮する，目標計画法（Goal programming）やSWT（Surrogate Worth Trade-off）[17]法等を用いることも可能であり，これについては次の機会に報告したい。

後述のケース・スタディでは，単一の目的項目に関する目的関数①～③について最適配分シミュレーションを行なった。その際には，目的関数で示される目的項目以外目的は，その必要水準を与える制約条件として考慮される。したがって，目的関数で示される目的項目と制約条件で示される目的項目間のtradeoffは，必要水準の変化に対する感度分析により把握される。

線形計画法においては，現実問題に対応して制約条件式を数多く設定すれば，得られる解は現実的であり，実現の容易なものとなることが多い。一方，とりあげる条件が少なければ，実現は困難である反面，問題の特性を把握する上で都合がよい。

5 大和川流域の奈良盆地におけるケース・スタディ

ここでは第3・4章で示した理論を具体化するために，まず表－2の水資源連関表に沿って昭和47年度における大和川流域の奈良盆地における水量収支を把握した。そのために必要なデータは昭和47年度のものであるが，一部昭和45年度のものを用いた。

次に，流域内に入ってくる水量が与えられた場合に，各種観点からみてどのように水を配分するのが合理的であるかという最適配分モデルを，同地域に適用することにより，理論の検討を行なった。そのために，最適化を行なう対象年度も昭和47年とした。

対象とした奈良県内の大和川流域を図－4に示す。この地域は25の市町村から構成されており，奈良市・天理市・御所市および吉野郡大淀町の面積のうち，各々42.1％，19.1％，7.5％，76.8％は対象流域外にある。この地域は大和平野地域と呼ばれ，県内の都市活動・工業活動さらには農業活動の中心地である。

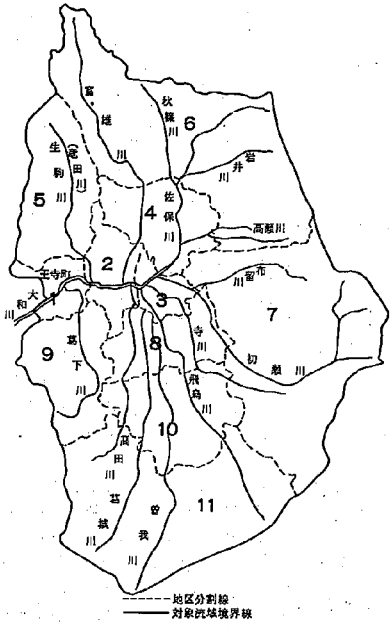
また，この地域では地表水と地下水の水文流域がほぼ一致しており，大体王寺町藤井の一か所から対象地域外への流出があるとみることができる。したがって，水量収支の把握がなされやすい地域とされている。

水利用現況の特徴としては，河川取水量の大半が，農業用水として使われていることがあげられる。また，下水道施設は奈良市と橿原市の一部で整備されているだけであり，河川水質は悪く，上水・工業用水はその多くを地下水に依存している。

諸活動の発展が著しいこの地域では，水資源開発計画や流域下水道整備計画が進められている。

〔1〕流域構成要素

第3章では，流域構成要素として10要素をとりあげたが，ここでは，この流域の特徴を考慮して，そのうち「導水」要素をなくし，「上水道」・「農業」が他流域から導水する場合には，それぞれの要素を直接に介して行なわれるとして取り扱う。本章で用いる要素と要素番号を次のように定める。



図－4 対象流域（大和川流域の奈良盆地）と地区分割

1. 河川　2. 地下　3. 上水道　4. 家庭　5. 業務　6. 工業　7. 農業　8. 下水道　9. 流域

〔2〕 地区分割

本研究では，第3章(3)(b)で述べたことに注意し，図－4のように地区割りを行なった。

〔3〕 水資源連関表による現状把握

3章で述べた水資源連関表を大和川流域で作成するにあたり，次のような同流域の特徴を考慮した。流域→上水道というルートを設けたのは，一部の地区が上水をため池から取水しているためである。また，この流域は地下水も含めて水文学的に閉じているとみることができるために，図－4で決定した地区のうち，第1地区を除いては地域外への流出はない。さらに，すべての地区で対象流域外からの河川水・地下水の流入（v_1^r，v_2^r），および流域外への地下水の流出（g_2^r）はないと考えてよい。農業用水は，主として吉野川水系から分水を受けているが，流域外への分水（g_7^r）は行なっていない。奈良市と橿原市を除けば下水道施設はなく，対象流域外との水のやりとり（v_8^r，g_8^r）はもちろんない。なお，降水の河川への流入（u_1^r）および河川水の蒸発（f_1^r）は，「流域」要素を介して行なわれるとして取り扱った。

水資源連関表の作成は，データ収集の都合上，必要データを2つのグループに分けて行なった。すなわち，市町村別に収集されている上下水道関係のデータについては，まず昭和47年度1年間について各市町村別の連関表を作り，先の地区割りに組みかえた。河川水・地下水の地区間移動，河川と地下の水のやりとりについては，先の地区分割に沿って把握した。表－4に水資源連関表の一部分を示す。また，図－5は，作成した連関表をもとにして，地区間を移動する水量を，地区間輸送機能をもつ要素別に表示したものの例である。すなわち，表－2における対角部分（A，E…）以外の部分（B，D，…）を，図で表示したものである。さらに，表－5は作成した水資源連関表をもとにして，流域全体としての各流域構成要素間の水のやりとり量を集計したものである。なお，水資源連関表には地区数をnとすれば$n \times n$個の部分行列があるが，地区間の水のやりとりを図－5のように表示すれば，必要な部分行列はn個となる。

現況把握を行なう際に，統計資料によっては入手が容易でないものもあり，特に「農業」・「流域」要素などに対しては困難を伴い，種々の仮定を設けることにより[13]その値を推定した。

〔4〕 ケース・スタディにおける水資源の配分・利用モデルの基本構造

前述の水資源配分・利用モデルは，次のようにして現実の問題に適用される。まず，地区内（同一地区内の要素間）および地区間の水配分ルートを設定する必要がある。これは，現状把握の結果および施設計画よりモデル化した。各地区内部の配分ルートは，表－2に示したとおりである。流域を構成する9要素のうち5要素（河川・地下・上水道・農業・下水道）では，水は地区間でやりとりされる。昭和47年度の大和川流域では，図－6にマトリックス表示したルートで水の地区間移動が起こりうるとして，各要素の地区間ルートを設定した。また，今回のシミュレーションでは，表－3に示される諸係数および河川水・地下水の分流比は現状の値を用いた。河川水・地下水の移動方向は，河床勾配，等地下水位線からそれぞれ決定した。

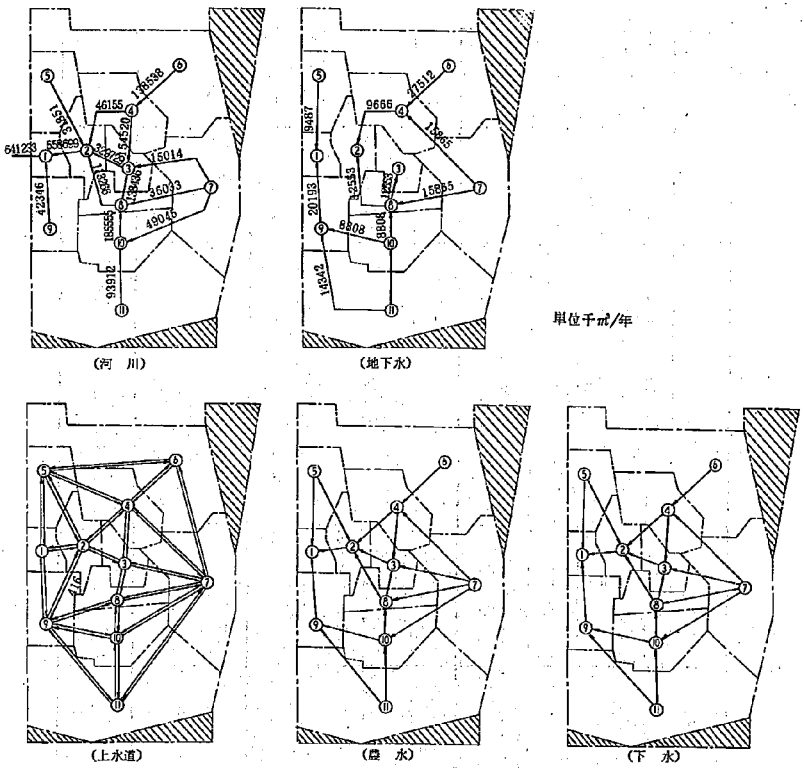
本モデルは，対象地域外（地域外および系外）から受けとる水を，対象地域内の各地区・各要素へ適正に配分するためのものであり，地域の降水量および他の地域からの流入量は，外生的に与えられる。用いた各種制約条件および諸係数については，補足（後記）を参照されたい。各種制約条件式は，各地区内の変数の

表－4 水資源連関表（現状）

単位 千m³/年

流入＼流出		（地区1） 1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	（地区2） 1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	他地区間関係へ	系外(o) g 地域外	系外(o) f 蒸発散
（地区1）	1 河川			165			－	2,209			－									－	641,233	
	2 地下水	31,498		2,423	10	1	821	116				0								0		
	3 上水道		590		1,639	218	141						－							－	－	
	4 家庭				－				－	1,451												198
	5 業務					－			－	193												26
	6 工業						60		－	817												145
	7 農業	1,760	1,737														－			－		1,737
	8 下水道	－		－	－	－	－	－										－		－		
	9 流域	9,139	2,862						－													9,540
（地区2）	1 河川	558,699											－			－	7,725			－	－	
	2 地下水		－								27,598		3,654	46	7	1,110	406			0		
	3 上水道			0								907		1,846	246	239				(9)へ 416	－	
	4 家庭													－				－	1,664			228
	5 業務														－			－	223			30
	6 工業															91		－	1,146			203
	7 農業							－			6,008	5,930								－		5,930
	8 下水道								－		－		－	－	－	－	－			－		
	9 流域										11,817	3,765						－				12,550
他地区間関係から		(9)から 42,346	(5)から 9,487 (9)から 20,193	－				－	－		(3)から 329,729 (4)から 46,155 (5)から 31,851 (8)から 113,266	(4)から 9,666 (8)から 12,553	－				－	－				
系外(o)	v 地域外			－				184					－				434					
	u 降水							2,725		19,245							9,303		25,099			

（注） 横線は今回のケース・スタディでは水の受けわたしが考えられないルートを示す。



図－5　地区間を移動する水の収支現況

流入地区＼流出地区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	0
1		■			■				■			○
2	■ ○ ●		■	■	■			■	■			
3		○ ●		■			■	■				
4		■ ▲ ○ × ●	■ ○ × ●		■	■	■					
5	■ ▲ ×	○ × ●		■		■						
6				■ ○ × ▲ ●			■					
7			○	■ × ▲ ●		■		■ ○ × ●		■ ○ × ●	■	
8		■ ○	■ ○ × ●				■		■	■ ○ ×		
9	■ ○ × ▲							■		■	■	
10							■ ○	■ ▲ ○ × ●	■ ▲ ○ × ●			■
11							○		■ ▲ ○ × ●	■ ▲ ○ × ●		

(注)　○；河川　▲；地下　■；上水道　×；農業　●；下水道
g；対象地域外を示す。

図－6　地区間を移動する水のルート

みで構成されるものと，地区間にまたがる変数をも含むものに分けることができる。このような線形計画法の問題は，主問題として各地区相互間の調整により全体としての最適化を目指す一つの問題と，副問題として各地区内部の最適化を目指す問題に分けて考えることができる。このような問題に対しては，分解原理（Decomposition Principle）を適用すると，現象の理解や計算機の必要記憶容量節約の上で有利である。[13] その考え方や計算方法は参考文献(7)，(16)，(20) に詳しく述べられている。

なお，本モデルは変数 529，制約条件式 489（地区内変数のみからなる制約条件式 374，地区間変数を含む制約条件式 115）から構成される。

〔5〕 分解原理による解法[20]

表－5　対象流域全体としての各要素間の水のやりとり

単位 千m³/年

流入＼流出	1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	他地区同要素へ	系外(o) g 地域外	系外(o) f 蒸発散
1 河川			8,828			363	172,643			1,933,108	641,233	
2 地下水	237,046		40,463	3,336	403	17,411	9,086			169,994		
3 上水道		16,180		58,908	6,208	6,852				416	4,831	694
4 家庭				—				4,002	50,774			6,836
5 業務					—			395	5,421			1,786
6 工業						2,435		387	20,542			15,748
7 農業	170,344	157,833								—		144,729
8 下水道	25,166		—	—	—	—	—			—		19,895
9 流域	388,761	133,732						20,382				446,270
他地区同要素から	1,933,099	169,994	416				—	—				
系外(o) v 地域外			43,688				27,236					
系外(o) u 降水							277,047		934,048			

ここでは，本研究で用いた分解原理による解法の概要を記す。

a）分解原理の適用性

線形計画問題に対して，分解原理は次のような互いに異なる2つの利点がある。

① 各パートの相互関係の明示的把握

この場合には，大規模な計画を"分権的"に解決する手続として分解原理を用いる。分解原理の適用により，もとの問題は，1つの主問題と多くの各パートに関係する副問題に分解される。そして，各パートごとの副問題では，各パートは与えられた条件下で自らの最適化を行ない，これを"案"として提示する。主問題ではこれらの間の調整を行ない，修正された条件を各パートに課す。これを繰り返すことにより，全体の最適化が行なわれる。

後述のように，例えばこれを水配分計画に適用すると，流域(地域)全体としての最適化のプロセスが，地区内部の最適化と地区間の調整として把握される。

② 計算の能率化

これは，線形計画問題の計算を能率化するための"道具"として，分解原理を使う場合の利点である。一般に，与えられた線形計画問題が次のように行列表示される場合

$$
\begin{aligned}
&max\ (or\ min)\ z\\
&sub.\ to\\
&A_1 X_1 \cdots\cdots\cdots\cdots A_T X_T = B_1\\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \vdots\\
&\bar{A}_1 X_1 + \cdots\cdots + \bar{A}_T X_T = B_0\\
&X_i \geqq 0\ (i=1,\ \cdots\cdots,\ T)
\end{aligned}
$$

すなわち，一部が対角線上に，残りが水平線上に係数部分行列〔a_{ij}〕をもち，その他の部分が全て0となっているような場合には，分解原理の適用は計算量を減じ，計算の規模を小型化する。

これをまともに解こうとすると，個々のA_jまたは$\bar{A}_j$を$(m\times n)$の行列とすれば，$m(T+1)\times nT$の巨大な係数行列となる。分解原理の適用は，これを$m\times nT$の大きさをもった主問題1個と，$m\times n$の小さな副問題T個に分解する。この分解は，問題が巨大で計算機の主記憶装置（コアメモリ）の容量を越えるような場合には，特に大きな利益をもたらす。全体としての繰越し計算回数が増えたとしても，磁気テープ等の低速大容量記憶装置を使うことによる計算速度の低下に比べれば，計算時間はかなり短縮される。

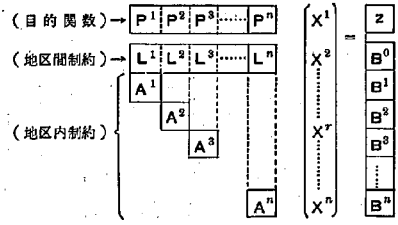
b）分解原理の構成

ここでは，水配分モデルを例にして，分解原理の数学的構成の概要を述べることにする。なお，分解原理はあらゆる線形計画問題に適用できるが，ここで例とするような形の問題に対しては特に有効である。

水配分問題は，行列表示すると次のように書くことができる。例として，次のような目的関数を最大にする場合を考える。

$$
\left.
\begin{aligned}
&max\ z=\sum_{r=1}^{n} P^r X^r\\
&sub.\ to \sum_{r=1}^{n} L^r X^r = B^0\\
&\qquad A^r X^r = B^r\ (r=1,\cdots\cdots,n)
\end{aligned}
\right\}\cdots\cdots\ (31)
$$

ただし，制約条件式のうち後者は地区 r 内の変数のみからなる制約条件式（地区内制約）であり，前者はそれ以外の変数をも含むもの（地区間制約である。これを図示すると次のようになる。



図－7　(31)式の行列表示

このような問題に分解原理を適用すると，最適化の過程を，地区内部の最適化と地区間の調整過程として把握でき，かつ主計算機の必要記憶容量を節約することができる。

(31)式を解くためには，まず n 個の副問題（各地区に関する問題）の条件式 $A^r X^r = B^r$ $(r=1,\cdots\cdots,n)$ の若干の基底許容解〔地区内制約を満たしかつ非負（*non-negative*）である解〕$X_1^1, \cdots\cdots, X_k^1; \cdots\cdots, X_1^r, \cdots\cdots, X_\delta^r$ をあらかじめ計算しておかなければならない。これらの加重平均を X^r とすれば，

$$\left.\begin{array}{l} X^r = \sum_{p=1}^{T_r} \lambda_p^r X_p^r \\ \sum_{p=1}^{T_r} \lambda_p^r = 1,\ \lambda_p^r \geqq 0 \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (32)$$

となる。ただし，T_r は各地区の基底許容解の数（地区ごとに異なってよい）を示す。非負変数（*non-negative variable*）を変数とする連立一次方程式の許容解集合が凸集合であることの必然的な結果として，これらの加重平均値もまたそれぞれの副問題の許容解（必ずしも基底解であるとは限らない）を与える。

この X^r を(31)式に代入すれば

$$\left.\begin{array}{l} max\ z = \sum_{r=1}^{n} \sum_{p=1}^{T_r} P^r X_p^r \lambda_p^r \\ sub.\ to \sum_{r=1}^{n} \sum_{p=1}^{T_r} L^r X_p^r \lambda_p^r = B^0 \\ \sum_{p=1}^{T_r} A^r X_p^r \lambda_p^r = B^r (r=1,\cdots\cdots,n) \\ \sum_{p=1}^{T_r} \lambda_p^r = 1,\ \lambda_p^r \geqq 0 \end{array}\right\} (33)$$

となる。さらに，X_p^r はもはや変数ではなく定ベクトルであることを考慮して，$P^r X_p^r = \bar{P}^r$, $L^r X_p^r = \bar{L}_p^r$ と書くことにすれば，変数 λ_p^r を変数とし，$\bar{L}^r$, $\bar{P}^r$ を係数とする主問題（地域全体に関する問題）が得られる。

$$\left.\begin{array}{l} max\ z = \sum_{r=1}^{n} \sum_{p=1}^{T_r} \bar{P}_p^r \lambda_p^r \\ sub.\ to \sum_{r=1}^{n} \sum_{p=1}^{T_r} \bar{L}_p^r \lambda_p^r = B^0 \\ \sum_{p=1}^{T_r} \lambda_p^r = 1,\ \lambda_p^r \geqq 0 \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (34)$$

これは典型的な線形計画問題であり，これを解いて最適解 λ_p^r, z^0 およびそれに対応する乗数（π_0^r, ℓ_0^r）を求めることができる。これら乗数は

$$\pi_0^r \bar{L}_p^r + \ell_0^r = 0\ (p=1,\cdots,T_r;\ r=1,\cdots,n) \quad (35)$$

を解くことによって求められる。

$\bar{L}_p^r$ を提示された基底許容解に対するものに限定する限り，$\pi_0^r \bar{L}_p^r + \ell_0^r < 0$ を満足する $\bar{L}_p^r$（z をさらに増加させることのできる $\bar{L}_p^r$ は存在しない。しかし，これ以外にも多くの基底許容解が存在するはずであり，n 個の副問題について，z の増加に貢献するような $\bar{L}_p^r$ をさがさなければならない。これは次の n 個の副問題を解くことにほかならない。

$$\min_p\ \pi_0^r \bar{L}_p^r \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (36)$$

ただし，$\bar{L}_p^r$ は，$A^r X^r = B^r$ $(r=1,\cdots\cdots,n)$ の基底許容解である。

これに，$\bar{L}_p^r = L^r X_p^r$ を代入し，$\gamma_0^r = \pi_0^r L^r$ と書くことにすれば，この r 個の副問題は典型的な線形計画問題の形になる。

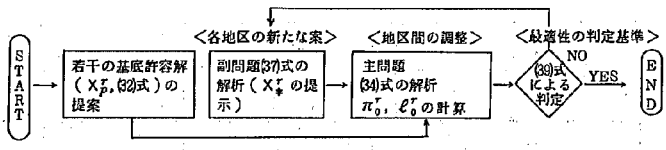
$$\left.\begin{array}{l} min\ \gamma_0^r X^r \\ sub.\ to\ A^r X^r = B^r\ (r=1,\cdots\cdots,n) \\ X^r \geqq 0 \end{array}\right\} \cdots (37)$$

(37)式の最適解 X_*^r から $\bar{L}_{p*}^r = L^r X_*^r$ を計算し，これを主問題の新たな係数ベクトルとして追加することにより，次の「制限された主問題（*restricted master program*）」が導き出される。

$$\left.\begin{array}{l} max\ z \\ sub.\ to \sum_{r=1}^{n} \sum_{p=1}^{T_r} \bar{L}_p^r \lambda_p^r + \sum_{r=1}^{n} \bar{L}_{p*}^r \lambda_*^r = B^0 \\ \sum_{p=1}^{T_r} \lambda_p^r + \lambda_*^r = 1;\ \lambda_p^r,\ \lambda_*^r \geqq 0 \end{array}\right\} \cdots (38)$$

この主問題の最適解から，新たな乗数（$\pi_0^{r\prime}$, $\ell_0^{r\prime}$）を求め，それに応じた新たな n 個の副問題を得る。

以上の計算を有限回繰り返すことにより，副問題がこれ以上 z を増加させ得ない状態に達し，初めの主問題（*full master probrem*）の最適解が得られる。この



図－8　分解原理による計算のプロセス

ときの判定条件は次式で与えられる。

$$\max_p (P^r - \pi_0^r L^r) X_p^r \leq \ell_0^r \quad (r=1, \cdots\cdots, n) \quad (39)$$

この判定条件が満たされない場合には，さらに解の改良が行なわれる。なお，途中で同時解が得られれば，それについての λ_p^r は他の λ_p^r と合計して1となることを要求せずに，任意の非負値（*non-negative value*）をとりうるというように，「制限された主問題」を書きあらためる。これは，すべての許容解の集合が，基底許容解の加重平均と基底同次許容解の非負結合との和として表わされるからである。

以上の計算プロセスを図－8に示す。

〔6〕 計算結果および考察

適正水配分シミュレーションは，3つの目的関数に対して行なった。目的関数の第1（ケースⅠ）は流域全体の水資源配分に関する総経費を最小に((27)式の後者)，第2（ケースⅡ）は水資源から見た収容可能人口を最大に（(28)式），第3（ケースⅢ）は同じく工業産出可能高を最大に（(29)式で $i=6$ ）するものである。

その結果の一部を，現状把握に関する表－4，図－5および表－5と同様の形式で表－6，図－9(a)～(c)および表－7(a)～(c)に示す。現状の水資源連関表をここで得られた結果を比較することにより，流域に内在する水資源をめぐる諸問題を検討することが可能である。

今回のシミュレーションから得られた主な結論は次のとおりである。

(i) 最適化計算において分解原理を用いることにより，実行可能領域内での流域全体の最適化を，地区部の最適化と地区間の調整過程としてとらえることができる。解の改良を行なうステップ回数にしたがって，目的関数がいかに変化していくかを図－10に示す。同図で目的関数が急変するところは，地区間変数に対して解の改良を行なったところであり，ここで考えているような水配分計画では，地区間の調整が結果に大きな影響をもたらすことを意味している。

(ii) 総経費を最小にする目的関数のもとでは，制約を満たす際に最も経費のかからない方法がとられる。シミュレーションの結果は，現状把握で得られたものと類似している。したがって，従来の利水方式が，総経費最小の方向性をもっていたと考えることもできよう。なお，計算の結果得られた総経費は，現状の約3割減であり，費用の面からも水配分合理化の余地があると考えられる。

(iii) 第2の目的関数のもとでは，1人当りの水使用量が少ない地区の人口収容能力が相対的に増大する。シミュレーションの結果は，この流域では水資源に関する投資可能額を増すと，水資源からみた収容可能人口が急増することを示している。

(iv) 第3の目的関数のもとでは，(iii)と同様に，すべての制約を満たしてまだ残っている水が，まず工業生産に対する水量原単位の小さな地区に与えられ，その地区の負担可能な費用の上限に達するまで水を使うと，次に原単位の小さな地区に水が割り当てられる。この場合には，上水・農水・下水の地区間移動が活発になる。これは，主として水量原単位の小さな地区での生産を増すことにより，流域全体としてより大きな利益を得ようとするためである。ケースⅡと同様に，可能投資額の増加とともに，水資源からみた産出可能高は急増する。

(v) さらに，感度分析の一例（図－11参照）でみるように，ケースⅢでは各地区が負担しうる水資源に関連した費用が増加する程，ますます原単位の小さな地区に水が集中する。その結果，原単位の小さな地区と大きな地区の産出可能高の格差が増大する。このことは，第2の目的関数の場合にも同様である。

(vi) 第2・3の目的関数を設定して行なったシミュレーション結果より，今回対象とした大和川流域では，水資源からみた地域の開発・発展の可能性は，水資源に関連した投資を行なうとすれば，十分大きいと考えられる。

(vii) 今回用いたような線形モデルでは，諸係数（定数）のうちあるもの（例えば投資可能限度額）は，結果に大きな影響を及ぼすことがある。同様に，制約条件の与え方により結果が大きく変化することもある。一般に，このような最適化問題において現実的な解が得られるかどうかは，制約式の設定と諸係数（定数）

表－6 水資源連関表（ケースⅠ）

単位 千m³/年

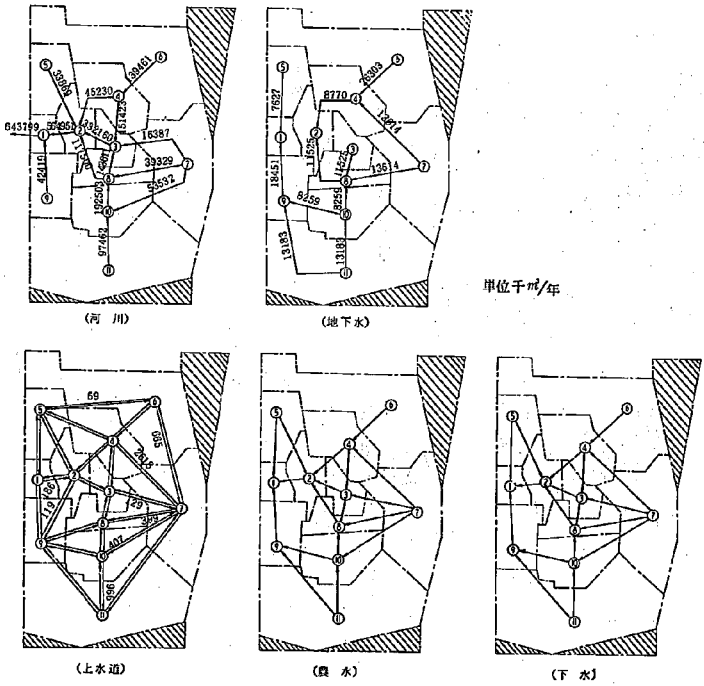
区分	流入＼流出	（地区1） 1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	（地区2） 1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	他地区同要素へ	系外(o) g 地域外	系外(o) f 蒸発散
I（区分1）	1 河川			19,977			201	2,209			－									－	643,799	
	2 地下水	36,154		2,423	472	63	821	0				－								0		
	3 上水道		5,107		15,263	2,030	0						－							(9)へ 186	0	
	4 家庭				0				6,923	6,923												1,888
	5 業務					0			921	921												251
	6 工業						0		434	434												153
	7 農業	1,719	1,699														－			－		1,699
	8 下水道	10,663		0	0	0	0	0										－		－		
	9 流域	13,287	2,147						2,385													9,540
II（区分2）	1 河川	564,951											0			330	7,725			(1)へ 564,951	－	
	2 地下水		－								25,542		2,925	57	8	1,110	0			－		
	3 上水道			0								726		1,835	246	0				－	0	
	4 家庭													0				832	832			227
	5 業務														0			112	112			30
	6 工業															0		612	612			216
	7 農業							0			5,867	5,797								0		5,797
	8 下水道								0		4,693		0	0	0	0	0			0		
	9 流域										8,145	2,824						3,137				12,550
他地区同要素から		(9)から 42,419	(5)から 7,627 (9)から 18,451	0				0	0		(3)から 332,160 (4)から 45,230 (5)から 33,869 (8)から 117,500	(4)から 8,770 (8)から 11,525	(9)から 119				0	0				
系外(o)	g 地域外			0				184					0				434					
	h 降水							2,725		19,245							9,303		25,099			

表－7(a)　対象地域全体としての各要素間の水のやりとり（ケースI）

単位 千m³/年

流入＼流出	1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	他地区同要素へ	対象流域外へ	系外（蒸発散）
1 河川			1.994			10.862	172.643			1.969.837	643.799	
2 地下水	215.631		39.734	3.385	385	16.199	0			154.313		
3 上水道		15.544		58.859	6230	0				5.558	* 4.831	
4 家庭				0				27.387	27.387			7.469
5 業務					0			2.911	2.911			794
6 工業						0		11.501	11.501			4.059
7 農業	167.116	154.905								0		154.905
8 下水道	158.339		0	0	0	0	0			0		
9 流域	286.532	104.886						116.540				466.159
他地区同要素から	1.969.837	154.313	5.558				0	0				
対象流域外から			*43.688				*27.236					
降水量							*277.047		*934.048			

(注)　*印は外生値であることを示す。

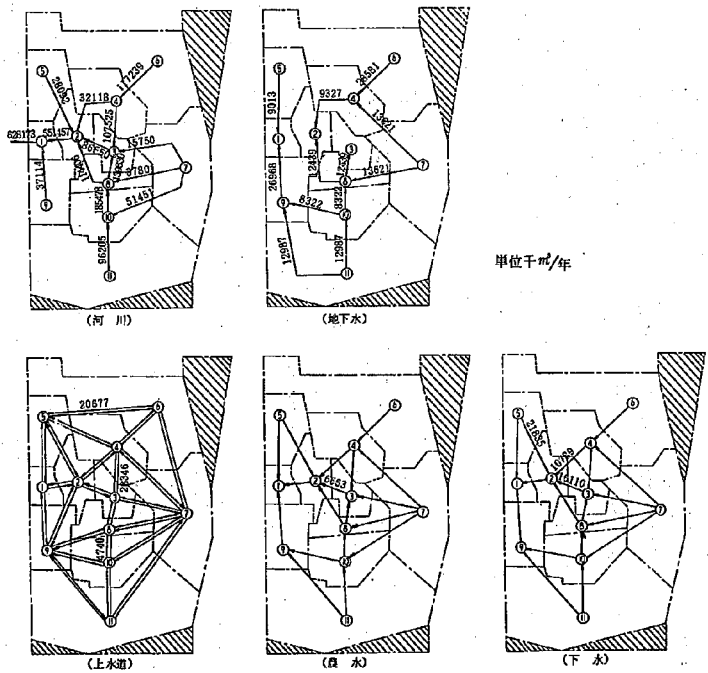


図－9(a)　地区間を移動する水の配分状況の表示(I)

表－7(b)　対象地域全体としての各要素間の水のやりとり（ケースII）

単位 千m³/年

流入＼流出	1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	他地区同要素へ	対象流域外へ	系外（蒸発散）
1 河川			134.090			12.569	172.643			1.601.016	628.173	
2 地下水	239.866		40.463	12.620	1.656	14.492	0			163.627		
3 上水道		17.097		147.980	18.387	0				53.763	* 4.831	
4 家庭				0				70.664	70.664			19.272
5 業務					0			8.819	8.819			2.405
6 工業						0		11.501	11.501			4.059
7 農業	162.692	157.116								6.663		157.116
8 下水道	207.522		0	0	0	0	0			48.734		
9 流域	335.717	104.886						116.540				466.159
他地区同要素から	1.601.016	163.627	53.763				6.663	48.734				
対象流域外から			*43.668				*27.236					
降水量							*277.047		*934.048			

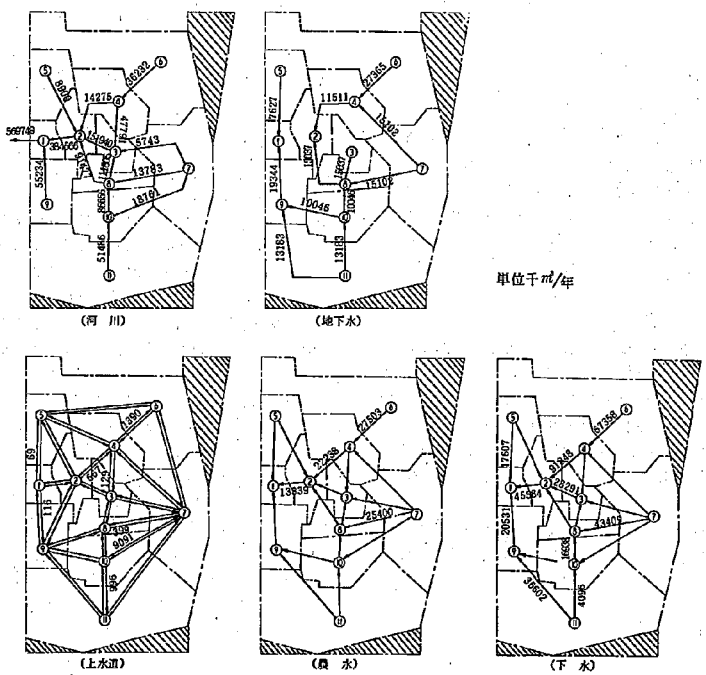


図－9(b)　地区間を移動する水の配分状況の表示III

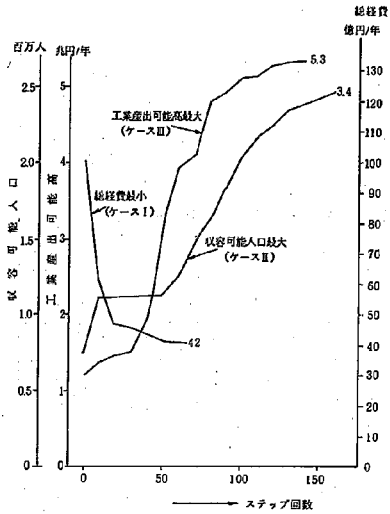
表－7 (C)　対象地域全体としての各要素間の水のやりとり（ケースⅢ）

単位 千㎥/年

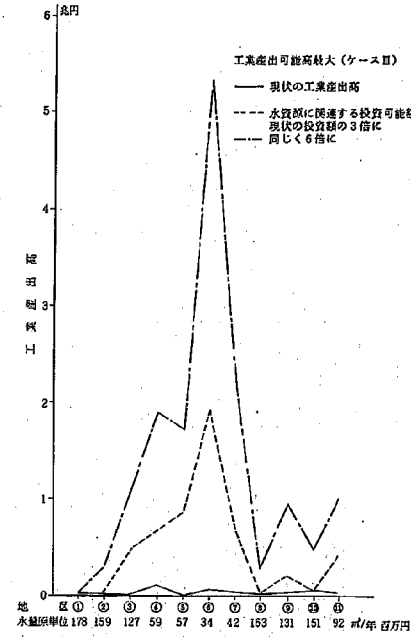
流入＼流出	1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	他地区同要素へ	対象流域外へ	系外（蒸発散）
1 河川			11.593			313.612	172.643			1.078.643	519.749	
2 地下水	259.521		31.164	3.385	385	11.283	0			172.583		
3 上水道		16.574		58.659	6.230	0				12.827	* 4.831	
4 家庭				0				27.387	27.387			7.469
5 業務					0			2.911	2.911			794
6 工業						0		138.080	138.080			48.734
7 農業	108.365	184.279								88.480		184.279
8 下水道	284.919		0	0	0	0	0			372.269		
9 流域	413.112	104.886						116.540				466.159
他地区同要素から	1.078.643	172.583	12.827				88.480	372.264				
対象流域外から			*43.698				*27.236					
降水量							*277.047		*934.043			



図－9 (C)　地区間を移動する水の配分状況の表示(Ⅲ)



図－10　目的関数の変化



図－11　水資源に関する負担可能な費用を変化させたときの感度分析

の与え方いかんによる。

(viii) 今回のシミュレーションは，あくまでも水資源の面から見たものであり，結果の解釈においてはこの前提を忘れてはならない。水配分計画立案の際には，シミュレーション結果と地域社会の関係等を多角的に検討し，多くのフィージビリティ・チェックとそれに伴うモデルの修正を行なう必要がある。

6　結　論

本研究の成果と今後の課題は次のとおりである。

(i) 流域(地域)における水収支の総合的な把握方法として，水資源連関表を提案した。現状では，データの入手の困難さから，いくつかの仮定を必要とするが，このような水量収支のとらえ方は可能であり，各地区の総流入量・総流出量・水利用量・水利用率・河川取水量等を把握することができる。

(ii) 水資源の配分・利用問題を，上記の水量収支のとらえ方にもとづいて定式化した。解法の手段として分解原理を用い，最適化の過程を地区内部の最適化と地区間の調整としてとらえた。

(iii) 大和川流域の奈良盆地でケース・スタディを行ない，(i)，(ii)の方法を具体化した。

(iv) 今回のケース・スタディにおける現状把握では，水資源連関表の適用性の検討を行なうとともに，現存する資料や解析法により，流域(地域)の水収支を現在なしうる精度で総合的に把握してみることにより，今後の水資源に関する調査・研究のあり方を明確にすることも一つの目的とした。その結果として，大和川流域の奈良盆地に関しては，「農水」や「流域」要素などに関する資料が不足しているように思われた。また，直接測定されていないデータは，解析法等を用いて推定する必要があるが，その手法も水文量によって精度がまちまちである。総合的な流水の管理を行なうためには，全体としてバランスのとれた観測や解析法の開発を行なうべきであると考えられる。

(v) 本研究では，水収支を年間のトータル量でとらえたが，今後は流域に入ってくる水量や水利用状況の季節変動等を考慮しうる，任意の期間を対象とした手法の開発が必要である。そのような場合の状況把握では，前述のように流域構成要素における貯留（ストック）を考慮する必要があり，今回示したフローに対する水資源連関表を拡張して用いることが可能である。

(vi) 今回提案した方法を有効に用いるためには，従来河川に関して収集されてきた情報（資料）のみでな

く，広く経済・社会・環境等の地域社会の情報をも必要とする。したがって，流域の水管理を総合的に行なうためにも，地域データ・バンク・システムの整備が望まれる。[19]

謝　辞

本研究を進めるにあたっては，建設省近畿地方建設局企画部から資料の提供をうけ，また本報告をまとめる際には，東京工業大学吉川教授・森池助教授をはじめ，建設省河川局河川計画課の方々や，土木研究所赤羽支所の多くの研究員と討議し，有益な情報を得た。さらに，資料の収集・整理等では(株)長大橋設計センターの協力を得たことを記して感謝の意を表します。

【付録】　ケース・スタディに関する補足

1. 記号説明

(1) 変　数

x_{ij}^{rr} ：第 r 地区における i 要素から j 要素への水のうけわたし量

x_{11}^{rs} ：第 r 地区から第 s 地区に移動する河川水量

x_{11}^{rg} ：第 r 地区から対象地域外へ移動する河川水量

x_{22}^{rs} ：第 r 地区から第 s 地区に移動する地下水量

x_{33}^{rs} ：第 r 地区から第 s 地区に移動する上水量

x_{77}^{rs} ：第 r 地区から第 s 地区に移動する農水量

x_{88}^{rs} ：第 r 地区から第 s 地区に移動する下水量

f_4^r ：第 r 地区家庭用水の蒸発散量

f_5^r ：第 r 地区 業務用水の蒸発散量

f_6^r ：第 r 地区 工業用水の蒸発散量

f_7^r ：第 r 地区 農業用水の蒸発散量

f_9^r ：第 r 地区 流域水の蒸発散量

(2) 入力データ及びパラメータ

v_3^r ：対象地域外から第 r 地区に入ってくる上水量

v_7^r ：対象地域外から第 r 地区に入ってくる農水量

u_7^r ：第 r 地区 農業要素への降水量

u_9^r ：第 r 地区 流域要素への降水量

g_3^r ：第 r 地区 上水の対象地域外への分水量

x_{93}^{rr} ：第 r 地区における上水の流域要素（たとえばため池）からの取水量

A_4^r ：第 r 地区における家庭が受けとる水量の下限値

AM_4^r ：第 r 地区における家庭が受けとる水量の上限値

A_6^r ：第 r 地区における工業が受けとる水量の下限値

AM_6^r ：第 r 地区における工業が受けとる水量の上限値

A_7^r ：第 r 地区における農業が河川より取水する水量の下限値

AM_7^r ：第 r 地区における農業が河川より取水する水量の上限値

A_7^r ：第 r 地区における農業の総受水量の下限値

e_r ：第 r 地区における業務使用水量と家庭使用水量の比率

B_3^r ：第 r 地区における上水の地下水取水制限量

B_6^r ：第 r 地区における工業の地下水取水制限量

B_7^r ：第 r 地区における農業の地下水取水制限量

Q_1^r ：第 r 地区における河川の必要維持流量

QM_1^r ：第 r 地区における河川からの取水可能水量の上限

dR_r ：第 r 地区における家庭用水原単位（1人当り）

pR_r ：第 r 地区における工業用水原単位（単位生産額当り）

k_4^r ：第 r 地区における家庭に対する上水道普及率

k_5^r ：第 r 地区における業務に対する上水道普及率

s_4^r ：第 r 地区における家庭に対する下水道整備率

s_5^r ：第 r 地区における業務に対する下水道整備率

s_6^r ：第 r 地区における工業に対する下水道整備率

s_8^r ：第 r 地区における流域に対する下水道整備率

RP_4^r ：第 r 地区家庭要素の内部循環再利用に回しうる水量の全使用水量に対する割合

RP_5^r ：第 r 地区業務要素の内部循環再利用に回しうる水量の全使用水量に対する割合

RP_6^r ：第 r 地区工業要素の内部循環再利用に回しうる水量の全使用水量に対する割合

RU_4^r ：第 r 地区家庭要素で再利用しうる水量の全使水量に対する割合の上限値

RU_5^r ：第 r 地区業務要素で再利用しうる水量の全使水量に対する割合の上限値

RU_6^r ：第 r 地区工業要素で再利用しうる水量の全使水量に対する割合の上限値

p_2^r ：第 r 地区の地下水汚濁負荷濃度

p_7^r ：第 r 地区の農水の汚濁負荷濃度

p_8^r ：第 r 地区の下水の汚濁負荷濃度

p_9^r ：第 r 地区の流域水の汚濁負荷濃度

$\bar{p}_1^r$ ：第 r 地区の河川水に対する水質の環境基準値

e_{21} ：地下水が河川に流出するときの汚濁負荷量流達率

e_{71} ：農水が河川に流出するときの汚濁負荷量流達率

e_{61} ：下水処理場から河川に放流するときの汚濁負荷量流達率（=放流水質／処理場に流入する下水の水質）

e_{91} ：流域から河川に流出するときの汚濁負荷量流達率

e_{11}^{rg} ：第 r 地区の河川水が対象地域外へ移動するときの汚濁負荷量流達率

e_{11}^{rs} ：第 r 地区の河川水が第 s 地区へ移動するときの汚濁負荷量流達率

α_{11}^{rg} ：第 r 地区の河川水が対象地域外へ移動する場

合の分流比

α_{11}^{rs}：第r地区の河川水が第s地区河川に移動する場合の分流比

α_{22}^{rs}：第r地区の地下水が第s地区地下に移動する場合の分流比

α_{21}^{rr}：第r地区の地下水が自地区の河川に流出する場合の分流比

α_{32}^{rr}：第r地区の上水が地下に流入する率(漏水率)

α_{72}^{rr}：第r地区農水の地下浸透率

α_{91}^{rr}：第r地区流域水の河川への流出率

α_{92}^{rr}：第r地区流域水の地下浸透率

α_{4e}^{rf}：第r地区家庭用水の蒸発散率

α_{5e}^{rf}：第r地区業務用水の蒸発散率

α_{6e}^{rf}：第r地区工業用水の蒸発散率

α_{7e}^{rf}：第r地区農業用水の蒸発散率

α_{9e}^{rf}：第r地区流域水の蒸発散率

CT_r：第r地区が負担しうる取水，給水，配水，排水，処理等水利用に関する減価償却費と維持管理費の和

C_{ij}：流域構成要素iからj要素へ水量がうけわたされるときの単位水量当り減価償却費と維持管理費の和

D_{33}：上水の地区間移動に対する単位水量，単位距離当りの減価償却費と維持管理費の和

D_{77}：農水の地区間移動に対する単位水量，単位距離当りの減価償却費と維持管理費の和

D_{88}：下水の地区間移動に対する単位水量，単位距離当りの減価償却費と維持管理費の和

ℓ_{wr}：第r地区の上水道が対象地区外から分水を受けるときの費用算定距離

ℓ_{ar}：第r地区の農業が対象地域外から分水を受けるときの費用算定距離

ℓ_{33}^{rs}：第s地区の上水道が第r地区の上水道から分水を受けるときの費用算定距離

ℓ_{77}^{rs}：第s地区の農業が第r地区の農業から分水を受けるときの費用算定距離

ℓ_{88}^{rs}：第r地区の下水を第s地区に送るときに生じる費用を計算するための費用算定距離

2. 水資源連関表による現状把握

データ収集の都合上，水資源連関表の作成は，2段階にわけて作業を行なった。1つは，市町村別に収集されているデータにもとづいた市町村別水資源連関表の作成とその変換であり，あと1つは，河川水・地下水の地区間移動および当該地区の河川水と地下水のやりとりに関するものであるが，これは地区分割を行なった後の連関表に対して集計した。

市町村別水資源連関表の作成方針，使用データの詳細およびその結果については，参考文献(13)の別冊に記してあるが，ここではその概要を述べることにする。図－12に対象地域の全体図を示す。表－8は市町村別連関表を作るための基礎的データである。

(1) 市町村別水資源連関表作成の方針

市町村別連関表の作成方針を記せば次のようになる。

(i) 降水量

これは，対象流域を平野部と山地部にわけ，それぞれ代表的な降水量を用いた。図－12の市町村番号を用いると④～⑫，⑮～⑲を平野部とし，①～③，⑬⑭，⑳～㉙を山地部とした。

(ii) 降水の「農業」，「流域」要素への流入

U_3＝降水量×（「流域」面積－農地面積）

U_7＝降水量×農地面積

(iii) 上水道からの配水量

基本的には，水道統計などのデータを用いた。データがないもの（x_{34}^{rr}，x_{35}^{rr}）は表－8の原単位を用いて推定した。上水の流出入の残水量はx_{32}^{rr}とするが，差引きして足りない場合には，x_{34}^{rr}，x_{35}^{rr}を若干調整した。対象地域外にまたがる市町村では，対象地域外に送水する家庭・業務用水をg_3^rとして取り扱った。

(iv) 利水機能をもつ要素の流出入

・自給による家庭・業務用水は全て地下水によるものとした。

$$\left.\begin{array}{l} x_{24}^{rr} \\ x_{25}^{rr} \end{array}\right\} = \text{原単位} \times \text{地区人口} \times (1 - \text{上水道普及率})$$

・家庭要素からの蒸発散量

$f_4^r = (x_{24}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{84}^{rr}) \times$家庭蒸発散率

・家庭排水量

$x_{46}^{rr} = X_{*4}^{*r} \times (1 - \alpha_{4*}^{rf}) \times$下水道整備率

$x_{45}^{rr} = X_{*4}^{*r} \times (1 - \alpha_{4*}^{rf}) \times$（1－下水道整備率）

・業務蒸発散量，排水量

家庭に準ずる。

・工業蒸発散量，排水量

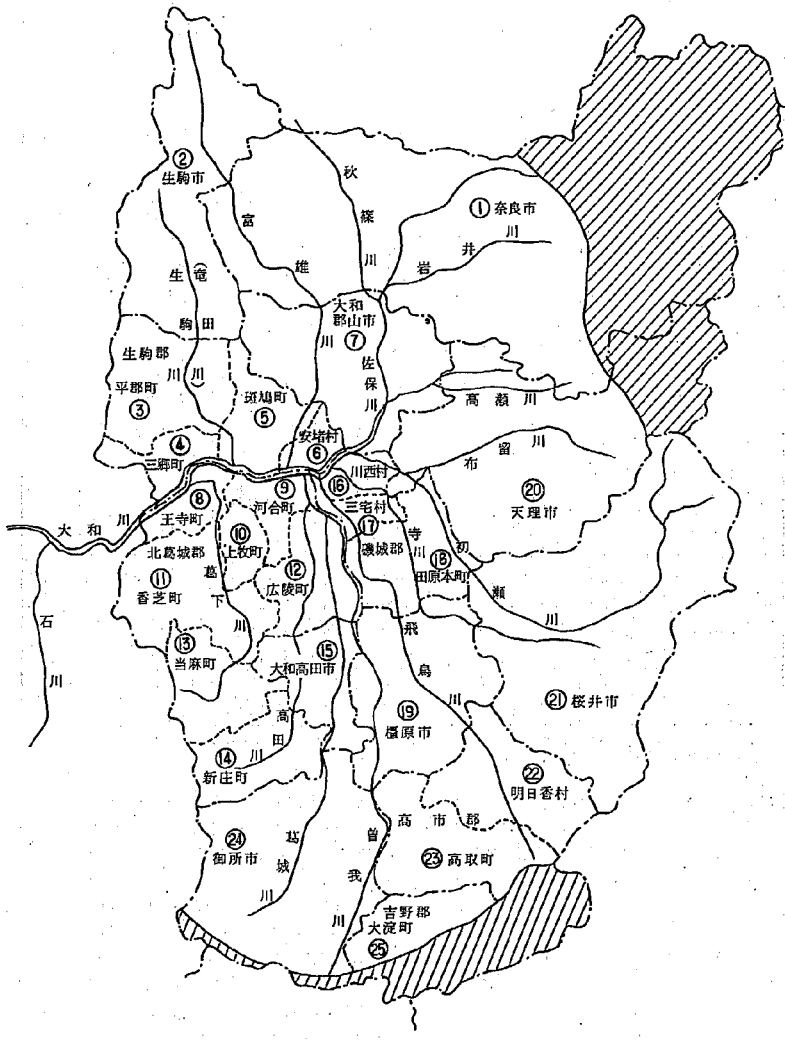
家庭に準ずる。

(v) 工業用水

工業用水の取水量は，「工業統計表（用地・用水編）」に工業地区別にまとめられており，取水源内訳として表流水・地下水・回収水およびその他がある。これを各工業地区内における市町村にふり分けるときには，工業産出高の比率を用いた。また，その他は回収水に含めた。

(vi) 流域要素からの流出

大和平野における昭和36，37，38年度の年間蒸発散量測定資料[15]から判断すれば，蒸発散率は約50％と考


①奈良市
②生駒市
③平郡町
④三郷町
⑤斑鳩町
⑥安堵村
⑦大和郡山市
⑧王寺町
⑨河合町
⑩上牧町
⑪香芝町
⑫広陵町
⑬当麻町
⑭新庄町
⑮大和高田市
⑯川西村
⑰三宅村
⑱田原本町
⑲橿原市
⑳天理市
㉑桜井市
㉒明日香村
㉓高取町
㉔御所市
㉕大淀町
秋篠川
富雄川
生駒川
竜田川
佐保川
高瀬川
布留川
寺川
初瀬川
飛鳥川
高田川
葛城川
曽我川
吉野郡
高市郡
北葛城郡
磯城郡
大和川
石川

図－12　流域全体図

表－8　市町村別原データー

項目 / 市町村	流域内人口 (人)	上水道普及率 (%)	下水道整備率 (%)	流域内面積 (km²)	流域内農地面積 (km²)	家庭用水原単位 (ℓ/人・日)	工業出荷額(産出高) (百万円/年)	工業用水原単位 (m³/年・百万円)
奈良市	196,858	98.3	20.6	122.70	17.34	273.0	41,974.0	32.7
生駒市	40,723	88.4	0	52.58	8.60	164.0	1,693.7	56.6
生駒郡平群町	9,208	92.8	0	24.03	4.39	165.0	1,511.1	56.9
三郷町	11,788	99.9	0	8.62	1.00	165.0	1,151.1	177.2
斑鳩町	18,871	98.3	0	14.58	4.16	164.0	4,499.9	177.6
安堵村	5,848	85.9	0	4.88	2.39	164.0	4,193.6	124.7
大和郡山市	64,280	98.0	0	42.74	14.56	247.0	120,717.2	59.3
北葛城郡王寺町	15,689	99.0	0	6.94	0.93	164.0	4,604.5	177.7
河合町	9,732	99.6	0	8.30	2.19	164.0	1,203.5	185.3
上牧町	9,077	96.7	0	5.92	1.37	164.0	523.2	175.8
香芝町	23,384	98.0	0	24.27	5.97	164.0	9,732.3	177.5
広陵町	17,914	98.4	0	16.65	7.22	164.0	9,104.4	177.5
当麻町	8,944	96.0	0	16.26	4.71	164.0	7,632.7	68.7
新庄町	14,218	93.4	0	17.53	5.91	164.0	9,352.2	68.6
大和高田市	56,046	98.4	0	16.73	7.22	247.0	21,505.2	177.5
磯城郡川西村	6,418	98.4	0	5.50	3.26	164.0	1,251.8	127.2
三宅村	6,665	80.2	0	4.97	2.06	137.0	1,509.8	127.2
田原本町	22,790	98.9	0	20.59	11.16	164.0	3,942.2	130.1
橿原市	85,074	97.7	6.58	40.43	16.79	247.0	23,988.5	126.9
天理市	51,766	97.3	0	69.38	14.47	246.0	9,867.6	42.5
桜井市	52,759	88.5	0	98.93	15.35	164.0	21,759.4	42.4
高市郡明日香村	6,459	0.	0	24.04	5.13	164.0	335.5	125.2
高取町	9,347	(10.0) 59.4	0	25.60	3.86	164.0	2,935.7	127.1
御所市	34,555	65.5	0	56.30	13.55	164.0	12,167.2	90.5
吉野郡大淀町	2,412	88.7	0	8.75	1.79	148.0	3,774.4	126.9

(注) 高取町の上水道普及率は，公表されたものでは59.4%であるが，原単位をもとに計算すれば，実際には10.0%位であると推定される。

えられる。降水量から蒸発散量を差引いた残りは①地表流出と②地下流動に分けられるが，年間のトータル量としてみた場合の①と②の比率は明確でなく，その値を仮定した。流域からの流出量は次式で求めた。

$$f_9^r = u_9^r \times \text{蒸発散率}$$

$$x_{98}^{rr} = u_9^r \times (1 - \text{蒸発散率}) \times r\text{地区に対する下水道整備率}$$

$$x_{91}^{rr} = (u_9^r - f_9^r - x_{98}^{rr}) \times \text{河川流出率} + (x_{49}^{rr} + x_{59}^{rr} + x_{69}^{rr})^{*}$$

$$x_{92}^{rr} = (u_9^r - f_9^r - x_{98}^{rr}) \times \text{地下浸透率}$$

(vii) 農業用水

大和平野における農水に関する情報は不確実なものが多く，以下に示す方針**で諸量を把握した。

・農業の要求水量

農業の要求水量は次のようにして計算した。

日減水深×カンガイ期間×農地面積

この場合のカンガイ期間は90日とした。水稲の生育ならびに生理作用に直接必要な水量は6mm/日前後にすぎないが，地下浸透や水路損失，余裕量を見込まねばならず，総量として20mm/日とした。

カンガイ期間（7～9月）の雨量は平地部で500mm，山地部で700mm程度であり，この水量は過不足にかか

* 各利用要素が直接河川に排水する水量（流域要素を介して）

** ここで用いた方針の多くは，黒沢俊一計画学講座『水質源計画』朝倉書店を参考にした。

わらず農業に入ってくる。しかし，この水量のみでは不足が生じるために，その場合の取水源の1つとしてため池がある。大和平野では，河川からため池に引水しており，その量は河川から取水したものに等しいと考えた。

農業の要求水量に対する水源は次の3つである。

① この間の雨（平地部500㎜，山地部700㎜）

② 吉野川からの分水

③ 残りを河川（ため池を含む）と地下から取水（その比率は仮定）

・農水の排水量と流出先

農水は，その一部が蒸発散し，残りが地下および河川に移動する。しかし，それらの正確な把握は困難であったために，次のような仮定によりその値を定めた。上記要求水量のうち一部は蒸発散し，残りが地下に浸透する（その比率は仮定した）。また，年間を通じての農水の河川への流出量は，（全降水量－カンガイ期の雨量）と仮定した。*

・吉野川からの分水を受けている市町村

この地域の吉野川からの総受益水量は，27,236千m^3/年であり，これを農地面積に比例して配分した。

ただし，受益しているか否かの判断は，経済企画庁と国土地理院による『淀川，大和川，紀川水系利水現況図』（昭和45年度）の「吉野川から大和平野への農水分水」の用水路整備状況から判断した。

(2) 行政区画単位からケース・スタディの各地区への変換

今回の変換は，①全面積の比率α_1，②農地面積の比率α_2，③人口の比率α_3，④業務活動の比率α_4，⑤工業活動の比率α_5，⑥上水道施設の比率α_6等を用いて，行政区画からケース・スタディの各地区へのふりわけを行なった。**

なお，本ケース・スタディは，地区分割により行政区画単位が分割されたのは，生駒市，生駒郡安堵村および天理市の3市村である。

(3) 対象地域における住居・商業・工業・農地の分布

人口集中地区（DID）の分布図は統計資料から作成し，住居・工業および商業については，昭和44年度「奈良県都市計画総括図」をもとにして分布図を作成した。また，農地の分布は昭和43年度の「大和川流域土地利用図」から求めた。

(4) 河川水・地下水の地区間移動および当該地区内での地下水の河川への流出

(i) 河　川　水

これは各河川の流量観測結果（一部は推定値）をもとにして決定した。これは，ケース・スタディの地区分割に沿って整理した。

(ii) 地　下　水

地下水資料[15]によれば，大和川の奈良県流域に降った水のうち，一時地下に浸透したものは再びすべて地表水となり，大阪府との府県境の王寺町藤井では河川流量として観測することができる。また他流域からの地下水の流入も考えられず，さらに地表水と地下水の水文流域も一致しており，この流域は水収支の把握には都合が良い。

この地域ではカンガイ期，非カンガイ期の等地下水位線が測定されており，これをもとにして地下水の流動を推定することになる。地下水の地区間移動量は，現状ではデータがほとんど収集されておらず，総流動量（＝総地下流入量）に対する比率を仮定した。また，地下水の河川への流出量も，総流動量に対する比率を仮定することにより推定した。

3. 水配分モデルの詳細

シミュレーションに際しては，以上に示した全ての変数を実変数としてとらえるのではなく，たとえば，第r地区から発する河川水の総量$\sum_s x_{11}^{rs}$を一つの変数としてとらえる。そうすると，x_{11}^{rs}は分流比α_{11}^{rs}を与えることによって決定される。地下水についても同様である。さらに，各地区内部の変数も，各種条件を与えることによって，実変数をかなり減少させることができる。実変数を減少させるための各種条件式を示せば以下の通りであり，①～⑫は表－3に示した運動に関する条件式，⑬～⑯は地区間の移動ルートをもたない要素の水量の連続条件式である。

① 河川水の分流

② 地下水の分流（地区間移動）

③ 地下水の分流（地区内河川への流出）

④ 上水の漏水

⑤ 家庭用水の蒸発散

⑥ 業務用水の蒸発散

⑦ 工業用水の蒸発散

⑧ 農水の地下浸透

⑨ 農水の蒸発散

⑩ 流域水の河川への流出

⑪ 流域水の地下への浸透

⑫ 流域水の蒸発散

⑬ 家庭用水の流出入連続式

* これらの仮定については今後検討を要する。参考文献（24）参照

** 参考文献（15）の別冊参照

⑭ 業務用水の流出入連続式

⑮ 工業用水の流出入連続式

⑯ 流域水の流出入連続式

(a) 制約条件

制約条件には，等式で表わされる物理的な制約条件と，不等式で表わされる場合が多い社会的な制約条件がある。これらを変数の種類で類別すれば，地区内部の変数だけで表わされる制約式と，地区間移動変数をも含む制約式の2つに分けられる。本ケース・スタディで用いた制約式を，第r地区に着目して示せば以下のようになる。

A. 地区内部の変数だけで表わされる制約式

A−1 家庭用水の総受水量はある値以上である。

$$x_{24}^{rr}+x_{34}^{rr}+x_{44}^{rr}+x_{64}^{rr}\geqq A_4^r \quad \cdots\cdots (40)$$

A−2 家庭用水の総受水量はある値以下である。*

$$x_{24}^{rr}+x_{34}^{rr}+x_{44}^{rr}+x_{64}^{rr}\leqq AM_4^r \quad \cdots\cdots (41)$$

A−3 工業用水の総受水量はある値以上である。

$$x_{16}^{rr}+x_{26}^{rr}+x_{36}^{rr}+x_{66}^{rr}+x_{86}^{rr}\geqq A_6^r \quad \cdots (42)$$

A−4 工業用水の受水量はある値以下である。**

$$x_{16}^{rr}+x_{26}^{rr}+x_{36}^{rr}+x_{66}^{rr}+x_{86}^{rr}\leqq AM_6^r \quad (43)$$

A−5 業務用水と家庭用水の比率が一定である。

$$x_{25}^{rr}+x_{35}^{rr}+x_{55}^{rr}+x_{85}^{rr}=\varepsilon_r\times(x_{24}^{rr}+x_{34}^{rr}+x_{44}^{rr}+x_{64}^{rr}) \quad \cdots\cdots (44)$$

A−6 上水道の地下水取水量はある値以下である。

$$x_{23}^{rr}\leqq B_3^r \quad \cdots\cdots (45)$$

A−7 工業の地下水取水量はある値以下である。

$$x_{26}^{rr}\leqq B_6^r \quad \cdots\cdots (46)$$

A−8 農業の河川取水量はある値以上である。

$$x_{17}^{rr}\geqq A_7^r \quad \cdots\cdots (47)$$

A−9 農水の河川取水量はある値以下である。

$$x_{17}^{rr}\leqq AM_7^r \quad \cdots\cdots (48)$$

A−10 農水の総受水量はある値以上である。

$$x_{17}^{11}+x_{87}^{11}+x_{97}^{11}\geqq A_7^{r'} \quad \cdots\cdots (49)$$

A−11 家庭内部の循環再利用に回しうる水量は，家庭用水総量のある割合(RP_4^r)以下である。

$$x_{44}^{rr}\leqq RP_4^r\times(x_{24}^{rr}+x_{34}^{rr}+x_{44}^{rr}+x_{64}^{rr}) \quad \cdots\cdots (50)$$

A−12 業務内部の循環再利用に回しうる水量は，業務用水総量のある割合(RP_5^r)以下である。

$$x_{55}^{rr}\leqq RP_5^r\times(x_{25}^{rr}+x_{35}^{rr}+x_{55}^{rr}+x_{85}^{rr}) \quad \cdots\cdots (51)$$

A−13 工業内部の循環再利用に回しうる水量は，工業用水総量のある割合(RP_6^r)以下である。

$$x_{66}^{rr}\leqq RP_6^r\times(x_{16}^{rr}+x_{26}^{rr}+x_{36}^{rr}+x_{66}^{rr}+x_{86}^{rr}) \quad \cdots\cdots (52)$$

A−14 家庭が使用しうる再利用水量は，家庭総使用水量のある割合 (RU_4^r) 以下である。

$$x_{44}^{rr}+x_{84}^{rr}\leqq PU_4^r\times(x_{24}^{rr}+x_{34}^{rr}+x_{44}^{rr}+x_{64}^{rr}) \quad \cdots\cdots (53)$$

A−15 業務が使用しうる再利用水量は，業務総使用水量のある割合 (RU_5^r) 以下である。

$$x_{55}^{rr}+x_{85}^{rr}\leqq RU_5^r\times(x_{25}^{rr}+x_{35}^{rr}+x_{55}^{rr}+x_{85}^{rr}) \quad \cdots\cdots (54)$$

A−16 工業が使用できる再生水は，工業使用水量のある割合 (RU_6^r) 以下である。

$$x_{66}^{rr}+x_{86}^{rr}\leqq RU_6^r\times(x_{16}^{rr}+x_{26}^{rr}+x_{36}^{rr}+x_{66}^{rr}+x_{86}^{rr}) \quad \cdots\cdots (55)$$

A−17 河川からの取水可能量の制約

$$x_{13}^{rr}+x_{16}^{rr}+x_{17}^{rr}\leqq QM_1^r \quad \cdots\cdots (56)$$

B. 地区間変数を含む制約式

B−1 河川水の連続条件式

$$\sum_s x_{11}^{sr}+x_{21}^{rr}+x_{71}^{rr}+x_{81}^{rr}+x_{91}^{rr}=x_{13}^{rr}+x_{16}^{rr}+x_{17}^{rr}+\sum_s x_{11}^{rs} \quad \cdots\cdots (57)$$

B−2 地下水の連続条件式

$$\sum_s x_{22}^{sr}+x_{32}^{rr}+x_{72}^{rr}+x_{92}^{rr}=x_{21}^{rr}+x_{23}^{rr}+x_{24}^{rr}+x_{25}^{rr}+x_{26}^{rr}+x_{27}^{rr}+\sum_s x_{22}^{rs} \quad \cdots\cdots (58)$$

B−3 上水の連続条件式

$$v_3^r+\sum_s x_{33}^{sr}+x_{13}^{rr}+x_{23}^{rr}+x_{83}^{rr}+\alpha_{93}^{rr}=x_{32}^{rr}+x_{34}^{rr}+x_{35}^{rr}+x_{36}^{rr}+\sum_s x_{33}^{rs}+g_3^r \quad (59)$$

B−4 農水の連続条件式

$$u_7^r+v_7^r+\sum_s x_{77}^{sr}+x_{17}^{rr}+x_{27}^{rr}+x_{87}^{rr}=x_{71}^{rr}+x_{72}^{rr}+f_7^r+\sum_s x_{77}^{rs} \quad \cdots\cdots (60)$$

B−5 下水の連続条件式

$$\sum_s x_{88}^{sr}+x_{48}^{rr}+x_{58}^{rr}+x_{68}^{rr}+x_{98}^{rr}=x_{81}^{rr}+x_{83}^{rr}+x_{84}^{rr}+x_{85}^{rr}+x_{86}^{rr}+x_{87}^{rr}+\sum_s x_{88}^{rs} \cdots (61)$$

*, ** 不必要な受水はしないという制約も必要である。ただし，設定する目的関数により，この上限に関する制約のいくつかは取り除く必要が生じる場合がある。

B－6　第r地区の河川水質の制約

$$p_1^r \leqq \bar{p}_1^r \quad \cdots\cdots (62)$$

$$i.e \quad r_1^r v_1^r + \sum_{\substack{s=1 \\ (s \neq r)}}^{n} p_1^s e_{11}^{sr} x_{11}^{sr} + p_2^r e_{21} x_{21}^{rr} + p_7^r e_{71} x_{71}^{rr} + p_8^r e_{81} x_{81}^{rr} + p_9^r e_{91} x_{91}^{rr} \leqq \bar{p}_1^r \left(x_{13}^{rr} + x_{16}^{rr} + x_{17}^{rr} + \sum_{\substack{s=1 \\ (s \neq r)}}^{n} x_{11}^{rs} + g_1^r \right) \quad \cdots\cdots (62)'$$

(62)′式は非線形であるが，p_1^sを$\bar{p}_1^s$あるいは想定水質でおきかえて線形化することもできる。*

B－7　第r地区が負担しうる減価償却費と維持管理費の和には制限がある。

$$C_{13} \cdot x_{13}^{rr} + C_{16} \cdot x_{16}^{rr} + C_{17} \cdot x_{17}^{rr} + C_{23} \cdot x_{23}^{rr} + C_{24} \cdot x_{24}^{rr} + C_{25} \cdot x_{25}^{rr} + C_{26} \cdot x_{26}^{rr} + C_{27} \cdot x_{27}^{rr} + C_{34} \cdot x_{34}^{rr} + C_{35} \cdot x_{35}^{rr} + C_{36} \cdot x_{36}^{rr} + C_{44} \cdot x_{44}^{rr} + C_{46} \cdot x_{46}^{rr} + C_{55} \cdot x_{55}^{rr} + C_{58} \cdot x_{58}^{rr} + C_{66} \cdot x_{66}^{rr} + C_{68} \cdot x_{68}^{rr} + C_{71} \cdot x_{71}^{rr} + C_{81} \cdot x_{81}^{rr} + C_{83} \cdot x_{83}^{rr} + C_{84} \cdot x_{84}^{rr} + C_{85} \cdot x_{85}^{rr} + C_{86} \cdot x_{86}^{rr} + C_{87} \cdot x_{87}^{rr} + C_{93} \cdot a_{93}^{rr} + C_{98} \cdot x_{98}^{rr} + D_{33} \cdot \ell_{wr} \cdot v_3^r + \sum_s D_{33} \cdot \ell_{33}^{sr} \cdot x_{33}^{sr} + D_{77} \cdot \ell_{ar} \cdot v_7^r + \sum_s D_{77} \cdot \ell_{77}^{sr} \cdot x_{77}^{sr} + \sum_s D_{88} \cdot \ell_{88}^{rs} \cdot x_{88}^{rs} \leqq CT_r \quad \cdots\cdots (63)$$

ただし，上水，農水に対しては，第r地区が他地区から分水を受ける場合については第r地区の負担とし，逆に下水については第r地区が他地区に送水する場合に第r地区の負担と考えた。

B－8　河川維持流量に関する制約**

$$\sum_s x_{11}^{rs} \geqq Q_1^r \quad \cdots\cdots (64)$$

なお，以上の制約式は，4(2)制約条件における表現と若干異なるものもあるが，本質的には同じである。また，A－2，4は4(2)⑩その他に関する制約条件である。

(b)　目的関数

今回のケース・スタディで用いた目的関数は次の3種類である。***

(1)　対象地域全体において取水，給水，浄水，排水等の水利用に関する総費用を最小にする。

$$\sum_s (C_{13} \cdot x_{13}^{rr} + C_{16} \cdot x_{16}^{rr} + C_{17} \cdot x_{17}^{rr} + C_{23} \cdot x_{23}^{rr} + C_{24} \cdot x_{24}^{rr} + C_{25} \cdot x_{25}^{rr} + C_{26} \cdot x_{26}^{rr} + C_{27} \cdot x_{27}^{rr} + C_{34} \cdot x_{34}^{rr} + C_{35} \cdot x_{35}^{rr} + C_{36} \cdot x_{36}^{rr} + C_{44} \cdot x_{44}^{rr} + C_{46} \cdot x_{46}^{rr} + C_{55} \cdot x_{55}^{rr} + C_{58} \cdot x_{58}^{rr} + C_{66} \cdot x_{66}^{rr} +$$

表－9　外　生　変　数　（千m³/年）

項目 / 地区	v_3^r	v_7^r	u_7^r	u_9^r	g_3^r	a_{93}^{rr}
1	0	184.0	2,725.0	19,245.0	0	165.0
2	0	434.0	9,303.0	25,099.0	0	0
3	0	1,054.0	10,549.0	9,030.0	0	0
4	0	2,884.0	20,559.0	39,790.0	0	0
5	0	0	9,329.0	73,977.0	0	51.0
6	30,283.0	287.0	46,602.0	237,931.1	3,223.0	49.0
7	0	5,619.0	45,664.0	214,418.0	687.0	1,465.0
8	1,260.0	3,640.0	25,953.0	33,733.0	0	0
9	2,938.0	2,387.0	18,734.0	52,798.0	0	0
10	8,024.0	4,756.0	33,902.0	46,808.0	0	0
11	1,183.0	5,991.0	53,727.0	181,228.0	921.0	0

* 本研究では，非線形式を用いて水質をチェックする方法，および線形近似した(62)′式を用いる方法について検討した。一般に，前者は水質問題があまり深刻でない場合，後者は水質問題が深刻な場合に適していると考えられる。参考文献(23)参照

* 今回のケース・スタディでは，年間のトータル量を取り扱うために，洪水時に利用されることなく流れ去る水量と環境等の面から要求される維持流量の和を，この制約に入れてシミュレーションを行なった。

*** このうちの1つを目的関数としてとりあげてシミュレーションをする場合には，他はその必要水準を与える制約条件式として考慮される。

$$C_{63}\cdot x_{63}^{rr}+C_{71}\cdot x_{71}^{rr}+C_{81}\cdot x_{81}^{rr}+C_{82}\cdot x_{82}^{rr}+C_{84}\cdot x_{84}^{rr}+C_{85}\cdot x_{85}^{rr}+C_{86}\cdot x_{86}^{rr}+C_{87}\cdot x_{87}^{rr}+C_{98}\cdot x_{98}^{rr}+\sum_{s}D_{33}\cdot \ell_{33}^{sr}\cdot x_{33}^{sr}+\sum_{s}D_{77}\cdot \ell_{77}^{sr}\cdot x_{77}^{sr}+\sum_{s}D_{88}\cdot \ell_{88}^{rs}\cdot x_{88}^{rs})\rightarrow min \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (65)$$

(2) 水資源からみた収容可能人口を最大にする。

$$\sum_{r}\frac{1}{dR_r}(x_{24}^{rr}+x_{34}^{rr}+x_{44}^{rr}+x_{84}^{rr})\rightarrow max \quad \cdots (66)$$

(3) 水資源からみた対象流域全体の工業産出可能高を最大にする。

$$\sum_{r}\frac{1}{pR_r}(x_{16}^{rr}+x_{26}^{rr}+x_{36}^{rr}+x_{65}^{rr}+x_{86}^{rr})\rightarrow max \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (67)$$

4. 入力データおよびパラメータ

入力データは現状把握資料ならびに市町村別原データ[13]から得た値を用い，できるだけ現実に合った結果を得ようと試みた。また，上水道普及率，下水道整備率などのパラメーターは，今回のシミュレーションではある一定値にセットした。

これらは，以下に記すように12種に分類でき，それらの値を表－9～表－20に示す。

(1) 外生変数

降水量や対象地域外に対する入出量データである(表－9)。

(2) 家庭用水原単位及び工業用水原単位

現況把握から得たものである(表－10)。

(3) 各種制限値

家庭用水，工業用水及び農水の河川からの取水量には下限を設け，その値は現状値とし，さらに業務と家庭の水量比率も現状の値を用いた。次に，上水道，工業及び農業の地下水取水量は，地盤沈下等を考慮して制限を設けることにし，現状の値を用いた。

河川流下水量に関する制約は，河川の維持流量と洪水時に制御されることなく流出する水量の和として求められる。今回は，その値を低水流量の約9割として認定した。それ以外の河川流量は，全て利用可能である(そのための利水施設は完備されるものとして，その費用は考慮する)として設定した(表－11)。

表－10　家庭・工業用水原単位

項目 / 地区	dR_r ℓ/日・人	pR_r ㎥/年・百万円
1	164.0	178.0
2	164.0	159.0
3	153.0	127.0
4	247.0	59.0
5	164.0	57.0
6	263.0	34.0
7	203.0	42.0
8	164.0	163.0
9	164.0	131.0
10	247.0	151.0
11	252.0	92.0

家庭および工業用水の総受水量の上限値，農業の地下水量の上限値は 99.9×10^7 ㎥/年*として設定した。また，農業の河川取水量の上限値は，上述の河川取水可能量とした。

(4) 汚濁負荷濃度と河川の水質環境基準値（今回はBODのみ）

各汚濁負荷発生要素の排出濃度は，汚水を200ppm，[13]

表－11　各　種　制　限　値

（千㎥/年）

項目 / 地区	A_4^r	A_6^r	A_7^r	ε_r (%)	B_3^r	B_6^r	B_7^r	Q_1^r
1	1,649.0	1,022.0	2,209.0	13.3	2,423.0	821.0	116.0	14.2×10^4
2	1,892.0	1,440.0	7,725.0	13.4	3,654.0	1,110.0	406.0	11.6×10^4
3	892.0	457.0	8,226.0	14.5	1,176.0	309.0	434.0	7.1×10^4
4	5,785.0	7,161.0	15,242.0	8.9	8,898.0	4,467.0	802.0	2.7×10^4
5	1,775.0	253.0	5,487.0	13.4	2,031.0	166.0	288.0	0.9×10^4
6	21,084.0	1,541.0	27,443.0	10.5	2,292.0	648.0	1,444.0	2.7×10^4
7	7,577.0	1,216.0	24,311.0	9.9	4,960.0	656.0	1,280.0	3.6×10^4
8	2,442.0	2,129.0	19,241.0	13.3	2,608.0	1,559.0	1,013.0	6.2×10^4
9	2,484.0	2,343.0	11,720.0	13.3	977.0	1,547.0	617.0	0.9×10^4
10	12,701.0	6,862.0	25,134.0	8.9	8,538.0	4,916.0	1,323.0	5.3×10^4
11	3,963.0	2,637.0	25,905.0	12.9	2,906.0	1,212.0	1,363.0	3.6×10^4

* 現実の値が不明確であったことから，今回のケース・スタディでは十分大きな値を設定した。

雨水を1 ppm[13]として現状把握資料から地区別に割出した。

また，環境基準値は，昭和50年，55年において10 ppmであるが，この基準値ではあまりにも厳しすぎるため，20 ppmとして入力した(表－12)。*

(5) 上水道普及率，下水道整備率

上水道普及率は現状把握で得た値を用いた。また，下水道整備率は，家庭・業務・工業に対してはそれぞれ50%とし，流域に対しては，下水道整備地域でも大雨時には下水を通らず，直接河川に流出する量があることを考慮して，上記50%の値をさらに下げて25%とした(表－13)。

(6) 再利用率，再利用対象用途の割合[13]

住居地区からの発生汚水のうち，集合住居地区からのものが占める割合は31.2%である。また，家庭要素内における再利用水の使用々途が便所・散水・洗車のみとすると，それらが家庭用水で占める割合は30.7%である。したがって，家庭用水総量のうち再利用水として使い得る割合，即ち，再利用率は上記2者の積と考えられ，9.6%とした。

同様に，業務地区からの発生汚水のうち，オフィスビルからのものの占める割合を45.4%，再利用水の使用々途を便所，モップのみとし，その割合を64.0%とすれば，再利用率は29.0%とした(表－14)。

工業については，用水型工業からのものの占める割合を55.2%，回収水も考慮して再利用水の使用々途を冷却・温調・製品処理及び洗浄の1/2とし，その割合を82.7%として，再利用率は45.6%とした(表－14)。

(7) 河川水分流比，地下水分流比

表－12　汚濁負荷濃度と河川の水質環境基準値(BOD)

(ppm)

地区＼項目	p_1^r	p_2^r	p_3^r	p_4^r	$\bar{p}_1^r$
1	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
2	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
3	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
4	5.0	20.0	200.0	100.0	20.0
5	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
6	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
7	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
8	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
9	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
10	5.0	20.0	200.0	100.0	20.0
11	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0

現状把握結果より定めた(表－15)。

(8) 河川流出率，地下浸透率

上水の地下浸透率(漏水率)は現状把握資料から求めた。また，地下水の当該地区河川への流出率，流域水の河川流出率・地下浸透率および農水の地下浸透率は，現況把握を行なう時の方針に従ってその値を定めた(表－16)。[13]

(9) 家庭・業務・工業・農業および流域各水量の蒸発率

現状把握を行なう時の方針に従って決定した(表－17)。[13]

(10) 流　達　率

河川への流出過程における汚濁負荷流達率が必要な要素は，地区内部においてはまず地下水があるが，これは0とし，農業は0.2,[13] 流域からの流達率は流域面積と人口密度に関係し,[13] 地区によってばらつきはあるが0.3とした。また，下水道からのものとしては，下水処理後の放流水質を処理場に流入する下水の水質(200 ppm

表－13　上水道普及率，下水道整備率

(%)

地区＼項目	k_4^r	k_5^r	s_4^r	s_5^r	s_6^r	s_9^r
1	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
2	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
3	87.0	87.0	50.0	50.0	50.0	25.0
4	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
5	87.0	87.0	50.0	50.0	50.0	25.0
6	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
7	92.0	92.0	50.0	50.0	50.0	25.0
8	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
9	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
10	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
11	75.0	75.0	50.0	50.0	50.0	25.0

* 大和川は1級河川の水質ワースト3に入っており，水質はきわめて悪い(昭和47年度当時)。

表－14 再利用に関する制限値

(%)

項目 / 地区	RP_4^r	RP_5^r	RP_6^r	RU_4^r	RU_5^r	RU_6^r
1	9.6	29.0	46.0	30.7	64.0	82.7
2	〃	〃	〃	〃	〃	〃
3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
4	〃	〃	〃	〃	〃	〃
5	〃	〃	〃	〃	〃	〃
6	〃	〃	〃	〃	〃	〃
7	〃	〃	〃	〃	〃	〃
8	〃	〃	〃	〃	〃	〃
9	〃	〃	〃	〃	〃	〃
10	〃	〃	〃	〃	〃	〃
11	〃	〃	〃	〃	〃	〃

表－15 河川水分流比 α_{11}^{rs} と地下水分流比 α_{22}^{rs}

(%)

r \ s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	g
1												100
2	100											
3		100										
4		23 (20)	77									
5	(70)	100										
6				100 (50)								
7			15	(30)				36 (30)		49		
8		45 (30)	55 (30)									
9	100 (50)											
10								100 (30)	(30)			
11									(30)	100 (30)		

(注) g は対象地域外を示す。( ) 内は地下水の場合を示す。

表－16 河川流出率，地下浸透率

(%)

項目 / 地区	α_{21}^{rr}	α_{22}^{rr}	α_{23}^{rr}	α_{11}^{rr}	α_{12}^{rr}
1	100.0	22.8	33.2	70.0	30.0
2	100.0	24.8	33.2	70.0	30.0
3	100.0	13.5	33.2	70.0	30.0
4	80.0	1.9	33.2	70.6	30.0
5	30.0	18.6	31.3	70.0	30.0
6	50.0	18.6	31.5	70.0	30.0
7	40.0	23.8	33.2	70.0	30.0
8	40.0	20.3	33.2	70.0	30.0
9	50.0	35.3	32.4	70.0	30.0
10	40.0	10.7	33.2	70.0	30.0
11	40.0	15.4	31.3	70.0	30.0

表－17 蒸発散率

(%)

項目 / 地区	α_{21}^{rf}	α_{22}^{rf}	α_{23}^{rf}	α_{11}^{rf}	α_{12}^{rf}
1	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
2	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
3	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
4	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
5	12.0	12.0	15.0	31.3	50.0
6	12.0	12.0	15.0	31.5	50.0
7	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
8	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
9	12.0	12.0	15.0	32.4	50.0
10	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
11	12.0	12.0	15.0	31.3	50.0

と考えた）で除した値を用いた。今回は，とりあえず処理後の放流水質を20 ppm とした。

次に，他地区から流入する場合には自浄作用を考え，自浄係数を $K=4.797\times10^{-6}\ sec^{-1}$，流下速度を $v=0.5\ m/sec$，流下距離 $\ell(m)$ は河川に沿う地区間重心距離をとって次式を用いた。[13]

$$k=exp\left(-K\cdot\frac{\ell}{v}\right) \quad \cdots\cdots (67)$$

(11) 費用係数及び各地区の負担可能な費用の上限値

(i) 費用係数には地区内部のものと地区間にまたがるものがある。まず，地区内部のものとしては，上水道が河川から取水するときの単位水量当り費用，あるいは下水を河川に放流するときの単位排水量当りの処理費用などがある。また，水の地区間輸送機能をもつ要素のうち，上水道，農業，下水道については，送水に伴う単位水量，単位距離当りの費用を必要とする。[13]

これらの費用係数は，減価償却費と維持管理費の合計として設定した（表－19(i)）。

(ii) 各地区の水利用者は，水利用に伴なって取水・導水・浄水・送水・配水・排水処理等の費用を負担しなければならないが，年間で負担し得る上限値を表－19(ii)のように設定した。

(12) 費用算定距離

上記表－19(ii)で記したように，水の地区間輸送機能をもつ要素のうち，上水道・農業・下水道についての地区間の送水（分水）費用を算出するときには，送水（分水）距離が問題となり，それらを費用算定距離と名付けた。また，上水道・農業は対象地域外から分水

表－18　流　達　率

(%)

e_{21}	0	e_{71}	20	e_{81}	10	e_{91}	30

e_{11}^{rs}　(%)

r \ s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	g
1												97
2	96											
3		97										
4		94	94									
5		92										
6				93								
7			95					92		97		
8		96	96									
9	94											
10								94				
11										92		

（注）　g は対象地域外を示す。

表－19(i)　費　用　係　数

(円/m³，円/m³/km)

C_{13}	20.0	C_{36}	20.0	C_{84}	60.0
C_{16}	10.0	C_{44}	150.0	C_{85}	60.0
C_{17}	5.0	C_{48}	10.0	C_{86}	60.0
C_{23}	10.0	C_{55}	100.0	C_{87}	20.0
C_{24}	10.0	C_{58}	10.0	C_{93}	20.0
C_{25}	10.0	C_{66}	50.0	C_{98}	5.0
C_{26}	10.0	C_{68}	10.0	D_{33}	0.4
C_{27}	10.0	C_{71}	1.0	D_{77}	0.2
C_{34}	20.0	C_{81}	10.0	D_{88}	0.1
C_{35}	20.0	C_{83}	50.0	—	—

表－19(ii)　負担可能な費用上限値

（億円）

項目 / 地区	CT_r
1	10.0
2	10.0
3	10.0
4	10.0
5	10.0
6	20.0
7	10.0
8	10.0
9	10.0
10	10.0
11	10.0

を受けているが，その際にも費用算定距離を必要とする。これについては，木津川水系からのときは15.0 km，吉野川水系からのときは20.0 km とした(表－20)。

表－20(i)　費用算定距離

（km）

項目 / 地区	ℓw_r	ℓa_r
1	0	20.0
2	0	20.0
3	0	20.0
4	0	20.0
5	0	0
6	15.0	20.0
7	0	20.0
8	20.0	20.0
9	20.0	20.0
10	20.0	20.0
11	20.0	20.0

表－20(ii)　費用算定距離

(a) 上水道 ℓ_{33}^{rs}，　(b) 農業 ℓ_{77}^{rs}

（km）

r \ s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		4.0			8.5				5.5		
2	4.0 (3.5)		4.0	6.5	8.5			5.5	6.5		
3		4.0 (4.0)		5.5			8.5	3.0			
4		6.5 (5.5)	5.5 (5.5)		6.5	7.0	11.5				
5	8.5 (7.0)	8.5 (8.0)		6.5		8.5					
6				7.0 (8.0)	8.5		17.0				
7			8.5 (8.0)	11.5 (10.0)		17.0		7.0 (8.5)		7.0 (10.0)	14.5
8		5.5 (5.5)	3.0 (5.0)				7.0		7.0	5.5	
9	5.5 (7.0)	6.5						7.0		7.0	5.5
10							7.0	5.5 (6.5)	7.0 (8.5)		7.0
11							14.5		5.5 (10.0)	7.0 (7.0)	

(注)　(　)内は農業の値を示す。

(c) 下水道 ℓ_{88}^{rs}

（km）

r \ s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2	4.0										
3		4.0									
4		6.5	5.5								
5	8.5	8.5									
6				7.0							
7			8.5	11.5				7.0		7.0	
8		5.5	3.0								
9	5.5										
10								5.5	7.0		
11									5.5	7.0	

参考文献

1) 合田健・末石富太郎・住友恒：工業用水計画における水量・水質配分について，土木学会論文報告集，No.134，1966年10月.

2) Earl, O.H., etal: National And Interregional Models of Water Demand, Land Use And Agricultural Policies, Water Resources Research, Vol. 9, No.4, August, 1973.

3) John, E.R.: Allocating Water Among Alternative Uses, Journal of The Irrigation And Drainage Division, Vol. 97, No.1, March, 1971.

4) МЕУИТОВ, И.И., ГЕРШКОВИУ, М.И.: Оптимизация ислользования волных ресурсов в дефицитных ло воде бассейнах, Гидротех и Мелиорация, 19 – 12, 1967.

5) ФЕЛЬДМАН, М.Л.: Олгимальное расдределение водных ресурсов между водололъзователями и водолотребителями, Гидротехнуеское Строигельство, No.4, 1967.

6) 春名攻・岡田憲夫：広域利水における水配分計画モデルに関する一考察，土木学会論文報告集，No.211，1973年3月.

7) 吉川和広・岡田憲夫：広域的・多角的な水配分問題に関するシステム分析，土木学会論文報告集，No.239，1975年7月.

8) 吉川和広・岡田憲夫：非線形計画モデルによる1水系流域における広域的・多角的水配分に関する一分析，土木学会論文報告集，No.247，1976年3月.

9) 末吉富太郎：用途別給水計画の研究，水道学会誌，No.436，1971年1月.

10) Calvin, G.C. etal: Optimal Allocation of Water Resources In Utah J. Hy. Div., A.S.C.E., October, 1973.

11) Huntington, S.S., etal: Optimization of Water Allocation Decisions Affecting Estuarine Ecology, Water Resources Bulletin, Vol. 7, No.4, August, 1971.

12) Jona Bargur: Dynamic Multisector Programming Approach To Regional Water Resource Management, Water Resources Research, Vol. 8, No.4, August, 1972.

13) 建設省土木研究所：水資源の利用配分に関するシステム分析，土木研究所資料，No.1125，1976年3月.

14) 高橋稠・池田喜代治：奈良県大和盆地の地下水，地質調査月報，Vol. 16, No.7, 1965年6月.

15) 窪田博：カンガイ用水が地下水に及ぼす影響について（その1）— 大和平野における地下水の実態，A.E.S.J., 1965年10月.

16) George, B.D., Philip, W.: The Decomposition Algorithm For Linear Programs, Econometrica, Vol. 29, No.4, October, 1961.

17) Haimes, Y.Y., Warrer, A.H.: Multiobjectives In Water Resource Systems Analysis; The Surrogate Worth Trade Off Method, Water Resources Research, August, 1974.

18) 建設省近畿地方建設局企画部：都市排水の質的制御システムに関する調査報告書，1975年3月.

19) 建設省土木研究所企画部：電子計算機を活用した地域情報システムの構想，土木技術資料，Vol. 18, No.8, 1976年8月.

20) 古瀬大六；数理計画法 I — 線型計画 —，共立出版，1971年6月.

21) 本間仁編；応用水理学下II（数値解析・水文観測），丸善K.K, 1971年3月.

22) 黒沢俊一；水資源計画，計画学講座9，朝倉書店，1974年6月.

23) 三好・関・吉川・朴：流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究，土木学会論文報告集（投稿中）

24) 岡田雅美：水田農業用水の計画需要量の推定法，水利科学，No.91, Vol. 17, 1973年.

（昭和52年3月30日 原稿受理）