

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2291号

土木研究所資料

重力ダム放流管埋設ブロックの応力解析

昭和60年12月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1985) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

重力ダムの放流管埋設ブロックの応力解析

ダム構造研究室 室 長 藤 沢 侃 彦
主任研究員 永 山 功
研 究 員 自 閑 茂 治
尾 畑 伸 之

要 旨

本報告書は、放流管埋設ブロック等の空洞部を有する重力ダムの安定解析法について論じたものである。このうち、第1章では、ブロック全体の安定解析法について論じ、梁理論を用いた方法と有限要素法による方法を紹介し、その得失について考察した。また第2章では、空洞部周辺の応力集中について論じ、有孔無限板による方法、2次元有限要素法による方法、3次元有限要素法による方法を紹介し、その得失について考察した。あわせて空洞部の形状、寸法が応力集中に及ぼす影響を検討し、設計の資料とした。

キーワード：重力ダム、放流管、応力集中、有限要素法

は じ め に

重力ダムの安定解析は通常ダム軸に直交した断面に対して2次元解析によって行われるが、放流管およびゲート室等の構造物によってダム堤体内に空洞部が存在するブロックに対しては、これを考慮した特別な解析が必要となる。すなわち、

① 空洞部を考慮したブロック全体の安定性の検討

② 空洞部周辺の応力集中の検討

である。①は通常の断面の場合と同様に、重力ダムの具備すべき3つの要件、すなわち、転倒、滑動および強度に対する安定性の検討を指すが、空洞部の影響を考慮した特別な解析が必要とされるものである。また②は空洞部周辺に生ずる応力集中の影響を検討するものであり、設計基準との関わりでは、局部的問題として鉄筋による補強で対処すればよいことになっている。

これらの検討については、従前より個々のダムで個別に対処してきたところであるが、近年大規模な放流管を有するダムが増えてきたことから、その設計方法を整理する必要性が生じてきている。そこで、本書ではまず解析方法についての取りまとめを行い、解析上の問題点について検討を加えた。また空洞部周辺の応力集中については空洞部の大きさが応力集中に及ぼす影響を検討した。

昭和60年12月

ダム構造研究室

目 次

はじめに

1. 放流管理設ブロック全体の安定性	1
1.1 設計上の要件	1
1.2 転倒に対する安定性	1
1.2.1 梁理論を用いた方法	1
1.2.2 有限要素法を用いた方法	3
1.3 滑動に対する安定性	8
1.4 強度に対する安定性	9
1.5 設計上の配慮	9
2. 局所的な応力集中に対する安定性	10
2.1 応力集中に対する設計	10
2.2 解析方法	10
2.2.1 有孔無限板の理論解	10
2.2.2 2次元有限要素法	13
2.2.3 3次元有限要素法	17
2.2.4 解析結果による考察	20
2.2.5 各解析法の適用性	23
2.3 開口部の形状寸法と応力集中	28
2.3.1 概 説	28
2.3.2 応力集中係数	28
2.3.3 総引張力	30
ま と め	32

1. 放流管埋設ブロック全体の安定性

1.1 設計上の要件

重力ダムの力学的安定性については、次の3つの要件が必要であるとされている。すなわち、

- ① (転倒に対する安定性) ダム堤体上流面には鉛直方向の引張応力を生じないこと。
 - ② (滑動に対する安定性) ダム堤体と基礎岩盤の接触部および基礎岩盤の滑り破壊に対して安全であること。
 - ③ (強度に対する安定性) ダム堤体内に発生する応力が堤体コンクリートの許容応力を超えないこと。
- の3つである。一般にこれらの要件は重力ダムのダム軸に直交する断面に対して2次的に検討されるが、放流管埋設ブロックのように堤体内に空洞部が存在する特殊ブロックについては、ブロック全体に対してこれらの要件が満足されているかいなかを検討しなければならない。そこで本章では、放流管埋設ブロック全体の安定性について検討を加えるものとする。

1.2 転倒に対する安定性

1.2.1 梁理論を用いた方法

転倒に対する安定性は、ダム堤体の任意標高の水平断面に対して、その上流端に鉛直方向の引張応力を生じさせないことで確保される。梁理論によれば、この条件は次式で表わされる。

$$\sigma_u = \frac{V}{A} - \frac{Ve}{I} y \geq 0 \quad (\text{圧縮を正}) \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ここで σ_u : 上流端鉛直応力

V : 解析断面に作用する垂直力

A : 解析断面の面積

I : 解析断面の断面二次モーメント

e : 垂直力 V の作用点と解析断面の図心までの距離

y : 解析断面の図心より上流端までの距離

したがって、上流端に鉛直方向の引張応力を生じさせないための条件は

$$e \leq \frac{I}{Ay} \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

または

$$e + y \leq \frac{I + A^2 y}{Ay} \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

となる。ここに、 $e + y$ は垂直力 V の作用点と上端までの距離である。

通常ブロックのような矩形の水平断面の場合、この条件はいわゆるMiddle Thirdの条件として知られており、ダム堤体に作用する荷重の合力の作用点は、矩形断面内の核、すなわち断面中央の1/3内を通らなければならないことになる。

しかし、放流管埋設ブロックのように、空洞部を含む水平断面では、その形が矩形断面とはならず、図 1.1 のような凹字形あるいは回字形になるため、断面内の核の位置はずれて、転倒に対する安定性の条件はいわゆる Middle Third の条件とは異なったものとなる。

いま一例として、図 1.2 (a) に示した凹字形断面の場合に対して核の位置を求めると、図中の記号を用いて、

$$X_1 \geq \frac{BL^3 - 3bL\ell^2 + 2b\ell^3}{3(BL^2 - b\ell^2)} \quad \dots\dots (1.2)$$

$$X_2 \leq \frac{2\{(B-b)L^3 + b(L-\ell)^3\}}{3\{(B-b)L^2 + b(L-\ell)^2\}}$$

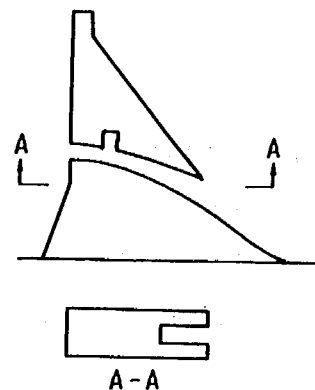
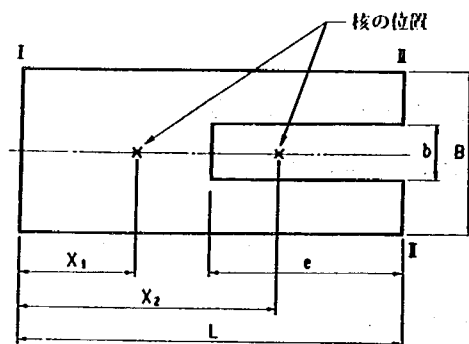


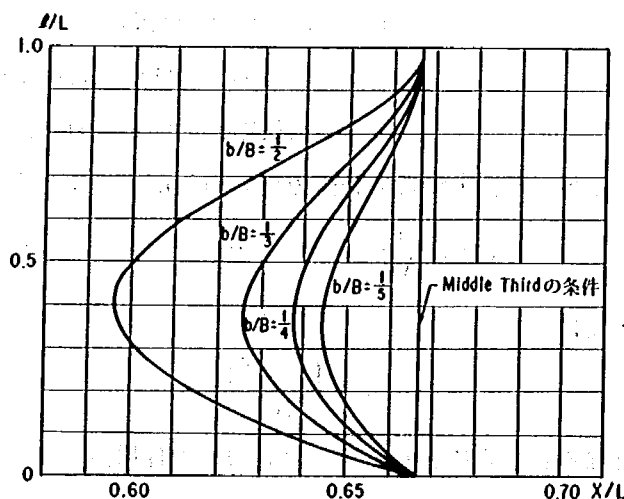
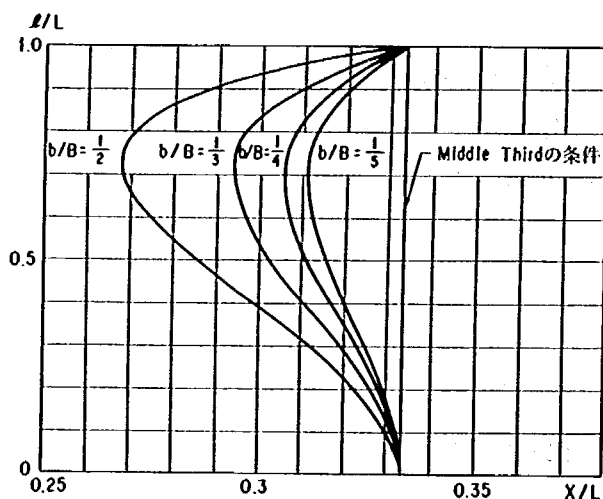
図 1.1 放流管部の鉛直断面及び水平断面

を得る。これを図示したものが図 1.2 (b), (c) である。

一般に転倒に対する安定性が設計上問題となるのは、下流側に切込みがある凹字形断面の場合であり、この場合図 1.2 (c) のように、上流面 (I-I 面) に引張応力を生じさせないための核の位置は、Middle



(a) 解析モデル



(b) II-II 面に引張応力を生じさせないための核の位置 (c) I-I 面に引張応力を生じさせないための核の位置

図 1.2 凹字形断面における核の位置

Third の条件よりもさらに内側に移行することになる。したがって、このような場合堤体上流面に引張応力を生じさせないためには、荷重の合力の作用点が図 1.2 (c) に示した核の内側にあるかどうかを確認しなければならない。

梁理論を用いた上記のような解析方法は、放流管理設ブロックの転倒に対する安定性を検討する方法としては比較的簡単な方法であるが、理論的には厳密さを欠いている。すなわち、一般に重力ダムのような三角形梁ではその断面厚が大きくても高い精度で梁理論が適用できることが知られているが、放流管理設ブロックのように梁の断面が急変する場合には厳密には梁理論を適用できず、解析結果には大きな誤差を生じる可能性を含んでいる。次の例はこれを端的に示すものである。すなわち、放流管がわずかな傾斜をもって堤体ブロックを横切る時、ある標高では凹字形の水平断面が現われ、転倒の条件は Middle Third の条件よりも厳しくなるが、もしこの放流管が完全に水平であれば、凹字形の水平断面は現われず、転倒の条件は Middle Third の条件そのものとなる。このように放流管のわずかな角度の差で転倒の条件が全く変わってくるのは、梁理論を適用したのが適切でなかったためである。

したがって、放流管等の空洞部の大きさが特に大きな場合、大規模なダムの場合など厳密な解析を必要とされる場合には、ここで示した方法に加えて次に示す有限要素法を用いた方法を併用し、安全性を確認する必要がある。

1.2.2 有限要素法を用いた方法

放流管理設ブロックの全体的安定性は、一般に前項で述べた方法によって検討されるが、特に開口部の規模が大きい場合、あるいは大規模なダムの場合には、有限要素法による厳密な解析を行って断面を検討することが望ましい。この場合、堤体内の応力状態を正しく求めるには 3 次元解析が必要であるが、空洞部周辺の応力集中については別途考慮するものとして、堤体全体の安定性、特に上流面の鉛直応力に限って検討するのであれば、ダム軸に直交した断面に対し、空洞部以外はブロック幅 B 、空洞部では空洞部の幅を減じたブロック幅 $B - b$ を有する板とし、“板厚を考慮した平面応力問題”として 2 次元有限要素法による解法を試みればよい。板厚を考慮した有限要素法では、板厚の効果を次のように表わしている。

$$t \{ f \} = \{ t \{ B \}^{-1} \{ D \} \{ B \} \} \{ u \} \quad \cdots \cdots \cdots (1.3)$$

$$\sum t \{ f \} = 0$$

(節点)

$$\{ \sigma \} = \{ D \} \{ B \} \{ u \}$$

ここで、 t : 板厚

$\{ f \}$: 板厚方向単位幅当りの節点力ベクトル

$\{ B \}$: 要素の変位ひずみ変換マトリックス

$\{ D \}$: 弾性係数マトリックス

$\{ u \}$: 節点変位ベクトル

$\{ \sigma \}$: 応力ベクトル

一般の2次元有限要素法では板厚を考慮することはできないが、弾性係数マトリックス等を変えることによって等価な計算を行うことが可能である。すなわち、 t_0 を任意の基準となる厚さとして、

$$\{f\}' = \frac{t}{t_0} \{f\} \dots\dots\dots (1.4)$$

$$\{D\}' = \frac{t}{t_0} \{D\}$$

とおけば(1.3)式は

$$\{f\}' = \{B\}^{-1} \{D\}' \{B\} \{u\}$$

$$\Sigma \{f\}' = 0 \dots\dots\dots (1.5)$$

(節点)

$$\{\sigma\} = \frac{t_0}{t} \{D\}' \{B\} \{u\}$$

となり、通常の有限要素法と同様な式になる。ただし、(1.5)式の第3式では t_0/t が含まれたかたちとなっているので応力の出力に対しても補正が必要となる。すなわち、これを要約すれば、 t_0 を任意の厚さとして、各要素に対して

- ① 節点荷重(外力, 自重)を (t/t_0) 倍して入力する。
- ② 弾性係数を (t/t_0) 倍して入力する。
- ③ 出力された応力を (t_0/t) 倍する。

という手続をとればよいことになる。ここで t/t_0 を有効断面率という。放流管埋設ブロックにおいては、 t_0 をブロック幅にとり、放流管部で

$$\text{有効断面率} = \frac{B-b}{B} \dots\dots\dots (1.6)$$

とすればよい。

この方法では、断面に直交する方向の変位、ひずみについては全く考慮していないから、第2章で述べるような空洞まわりの応力集中の影響は含まれず、したがって、その結果はブロック全体の安全性を評価する方法として利用できる。なお、本法では揚圧力を取扱うことはできないから、揚圧力の影響は有効応力

$$\sigma_e = \sigma - u \dots\dots\dots (1.7)$$

ここで σ :有限要素法より求めた応力

u :その点に作用する揚圧力

の形で考慮する必要がある。図1.4は、このようにして求めた2次元有限要素法による解析結果である。ここでは、図1.3に示すモデルダムについて、表1.1のような条件で計算を行っている。なお、この場合上流面鉛直応力については、上流面が鉛直であるからこれは第2主応力と一致し、したがって図1.4(b)の第2主応力をみればよいことになる。ただし、有限要素法では揚圧力を考慮できないため、上流面に鉛直

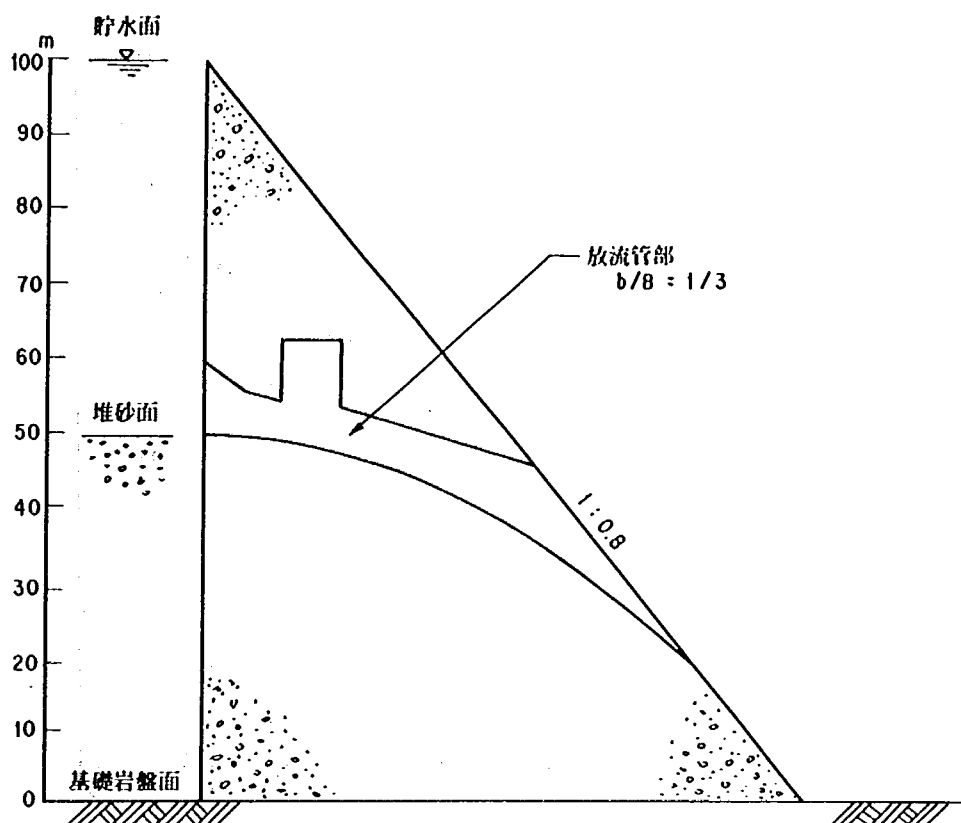
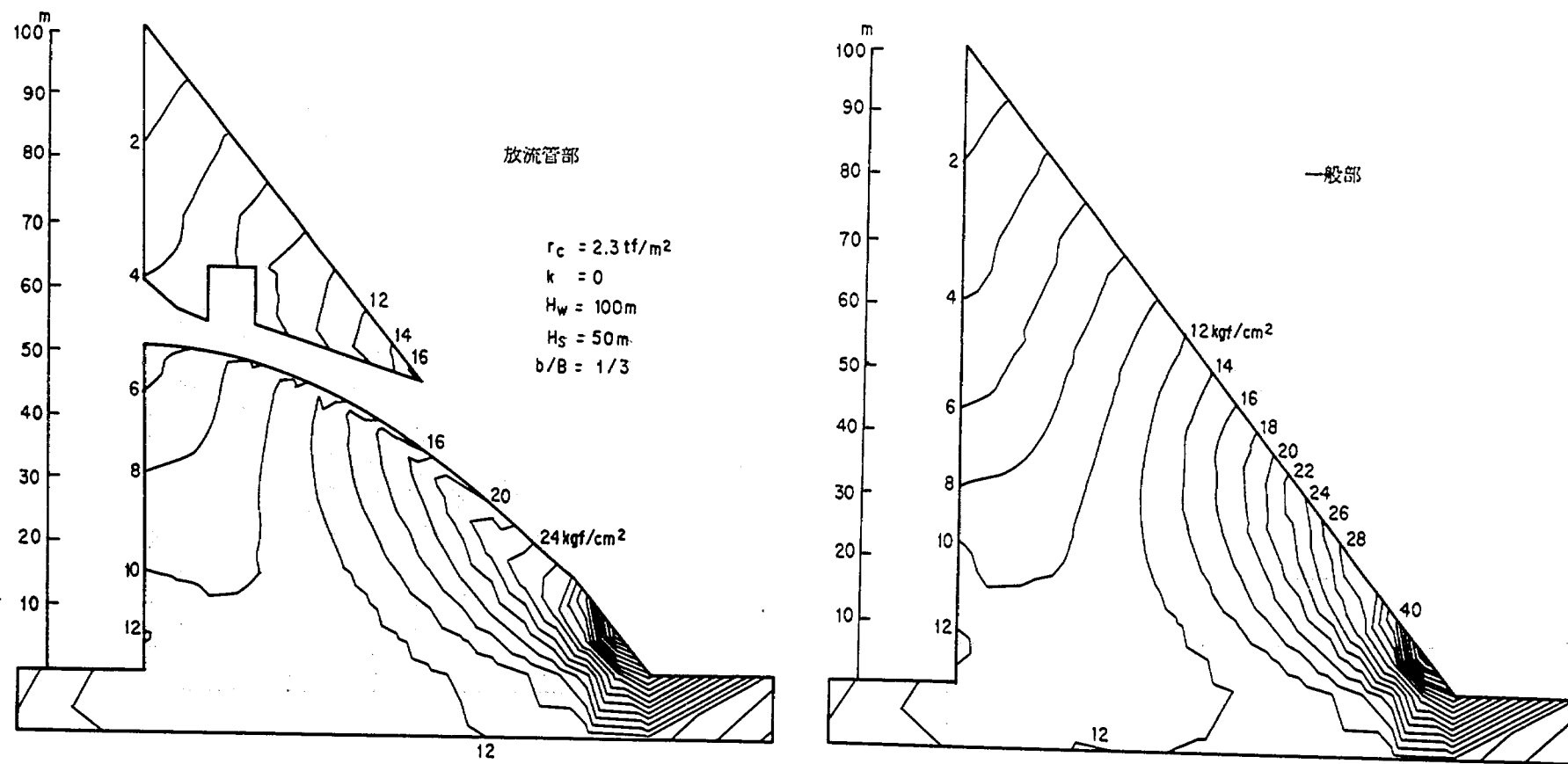


図 1.3 計算モデル

表 1.1 計算条件

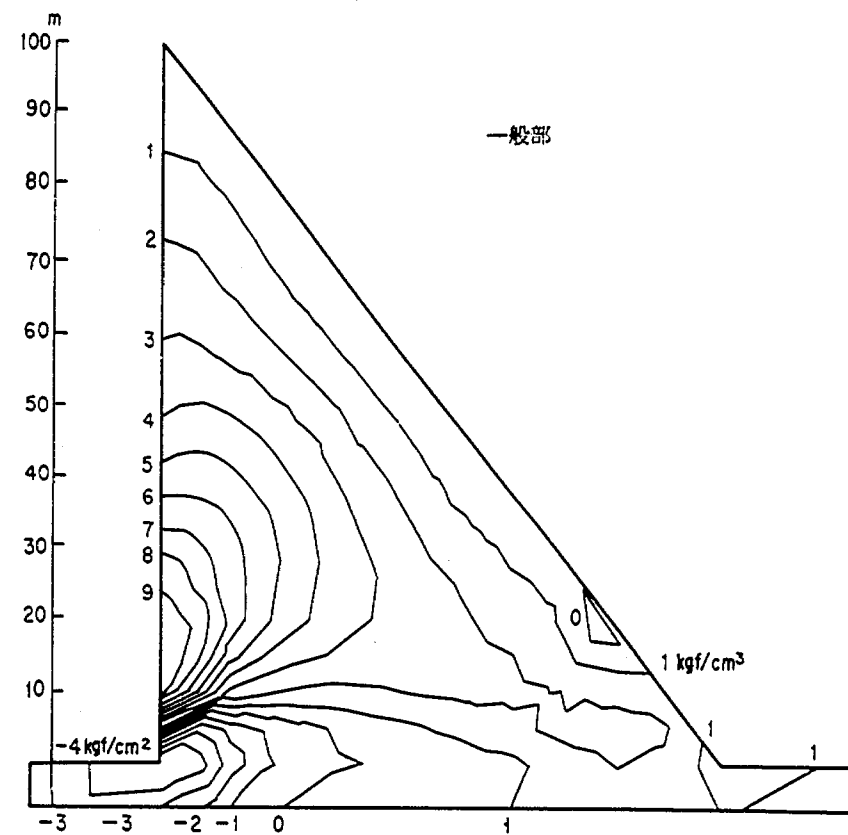
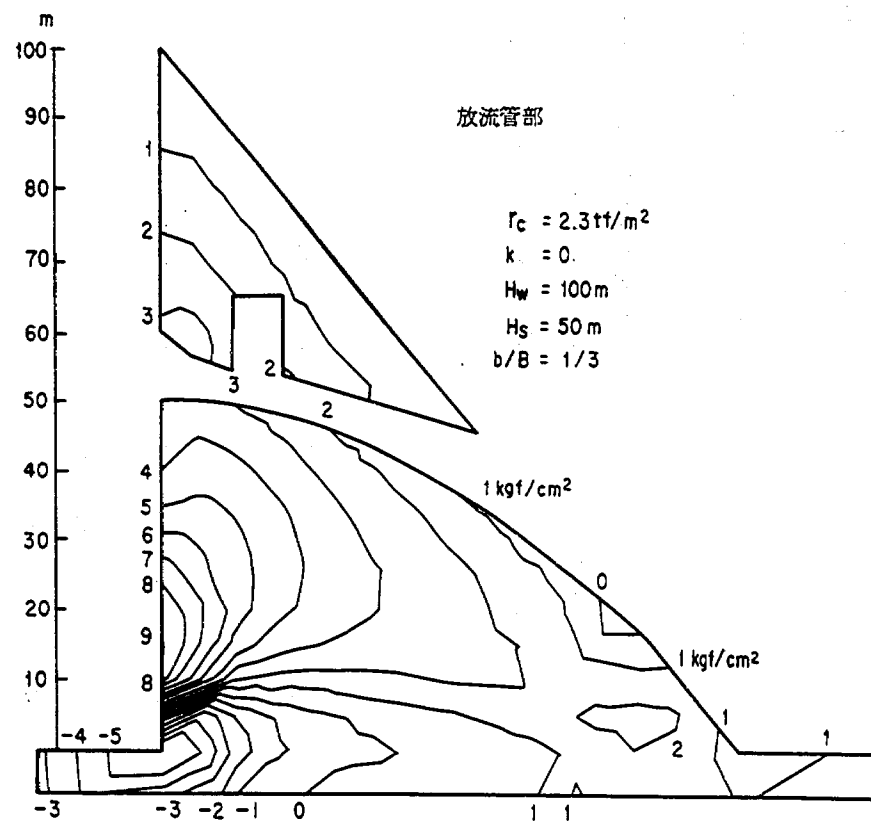
堤	高	$H = 100 \text{ m}$
貯水	位	$H_W = 100 \text{ m}$
堆砂	位	$H_S = 50 \text{ m}$
上流面	勾配	$m = 0.0$
下流面	勾配	$n = 0.8$
泥圧	係数	$C_e = 0.6$
コンクリートの単位体積重量		$W_O = 2.3 \text{ tf/m}^3$
堆砂の水中単位体積重量		$W_S = 1.0 \text{ tf/m}^3$
コンクリートの弾性係数		$E_O = 2.5 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$
基礎岩盤の弾性係数		$E_R = 2.5 \times 10^5 \text{ tf/m}^2$
コンクリートのポアソン比		$\nu_O = 0.17$
基礎岩盤のポアソン比		$\nu_R = 0.2$

注) 地震時荷重および揚圧力は含まれていない。



(a) 第1主応力

図1.4 有限要素法による放流管埋設ブロックの計算例



(b) 第2主応力

図 1.4 (つづき)

方向の引張応力がでるかいないかの判定は、算出した応力がその点の揚圧力よりも小さいかいないかで判断することになる。

図 1.5 には梁理論を用いた方法と 2 次元有限要素法を用いた方法の上流端応力を比較した結果を示した。比較のためどちらの方法も揚圧力は考慮していない。梁理論を用いた方法では 1.2.1 の図 1.2 に示されている通り、上流側が切れ込んだ凹形の場合、上流端圧縮応力は空洞部のない通常ブロックの上流端応力よりも圧縮側に移行しており、逆に下流側に切れ込んだ凹形の底面を持つ標高では引張側に移行している。また、着岩部付近で通常ブロックの上流端応力より小さくなっているのは自重の減少によるものである。次に、梁理論を用いた方法と有限要素法を用いた方法を比較すると、梁理論を用いた方法は空洞部の影響を過大に評価しすぎる傾向にあり、梁理論を用いた方法によって計算された断面は安全側すぎる不経済な断面となる場合があるといえる。したがって、空洞部の規模が大きい場合は、有限要素法を用いた方法によって応力の検証を行うのが望ましい。

なお、有限要素法を用いた解析では、着岩部やフィレット取付け部付近に応力集中が現われるが、設計基準でいう上流面鉛直応力は梁理論に基く応力を基本としているように応力集中の影響を含まない値と考えられるので、これらの個所の応力については有限要素法の結果に対して技術的判断が要求されることになる。

1.3 滑動に対する安定性

ダムと基礎岩盤との接触部における滑動に対する安定性は、通常ブロックに対しては、次の Henny の式で検討される。

$$n = \frac{\tau_0 \ell + f V}{H} \quad \dots \dots \dots (1.8)$$

ここで τ_0 : せん断強度 (tf/m²)
 ℓ : せん断面の長さ (m)
 f : 内部摩擦係数

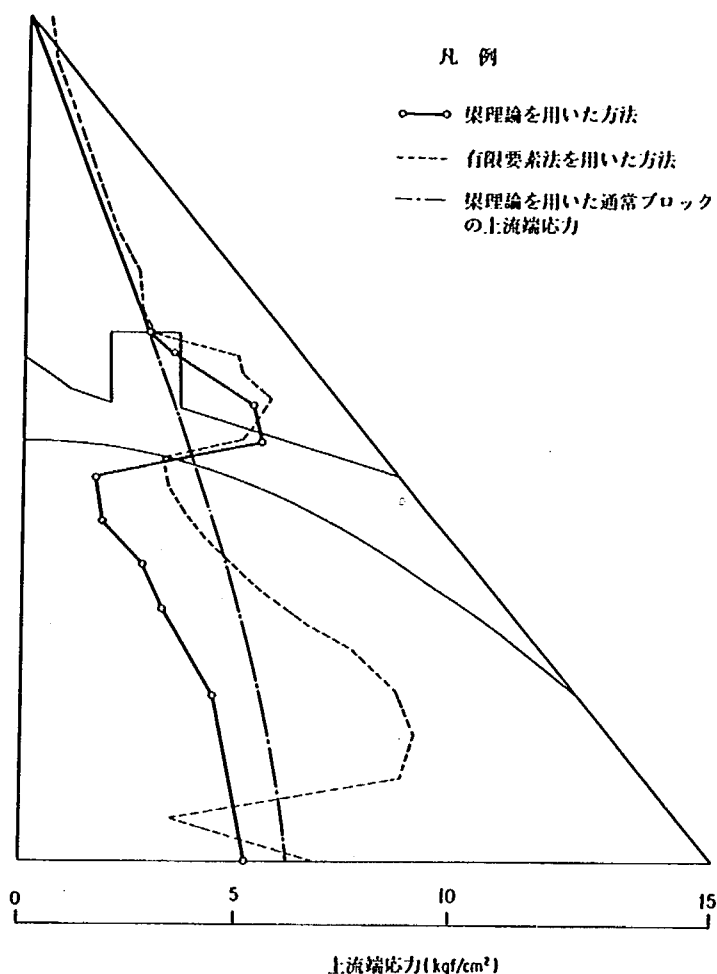


図 1.5 各解析法による上流端応力の比較

V : 単位幅当りのせん断面に作用する垂直力 (tf/m)

H : 単位幅当りのせん断面に作用するせん断力 (tf/m)

放流管埋設ブロックでは、単位幅当りの解析でなく、ブロック全体の解析が必要となるため、これに対応する Henny の式は (1.8) 式にブロック幅を乗じ

$$n = \frac{\tau_0 A + f V}{H}$$

ここで A : せん断面の面積 (m²)

V : せん断面に作用する垂直力 (tf)

H : せん断面に作用するせん断力 (tf)

とすればよい。この場合、せん断面に作用する荷重は、空洞部の存在による堤体自重の減少を考慮しなければならないことはいうまでもない。そのほか、通常ブロックの解析と特段変わるところはない。

1.4 強度に対する安定性

強度に対する安定性は、堤体内に発生する応力が堤体コンクリートの許容応力を超えないという条件によって確保される。

一般に重力ダムの堤体内に発生する応力は堤体コンクリートの許容応力を十分に下回るため、堤高が、150 m を越えるような一部の大ダムの低標高部分を除き、この条件が設計上問題となることはない。したがって、放流管埋設ブロックにおいても、このような問題が生じることは少ないといえる。

強度に対する安定性の検討が必要と認められる場合は、1.2 転倒に対する安全性で述べた 2 つの方法がそのまま適用できる。ただし、有限要素法の場合には、前述のように着岩部付近の応力集中の評価について技術的判断が要求されることになる。

1.5 設計上の配慮

放流管埋設ブロックにおいて、重力ダムの安定性に関する 3 つの要件が満足されない場合には、堤体形状の変更でこれに対処する必要がある。この場合問題となる可能性があるのは、転倒と滑動に対する安定性である。転倒に対する安全性を確保するには、上流面にフィレットを設けるか、下流面勾配を緩くする必要がある。上流面のフィレットで対処する場合、放流管埋設ブロックだけの断面変更ですむが、フィレットとしてかなり大きな断面が必要となり、経済的でないことがある。また下流面勾配を緩くする場合、勾配の変化は少なくすむが、その影響は放流管ブロックだけでなく全ブロックに及ぶことになる。ただし、勾配の変化が小さければ、導流壁を利用して、その影響を越流部のみに限定するなどの方法も考えられる。

また、基礎岩盤との接触面における滑動に対する安定性を確保するには、通常ブロックの場合と同様に、上流面のフィレットで対処すればよい。

2. 局所的な応力集中に対する安定性

2.1 応力集中に対する設計

第1章では、放流管埋設ブロックの全体としての安定性について述べたが、放流管等の空洞部周辺には、このほか局所的な応力集中が生じる。この応力集中に対しても設計上の配慮がなされなければならないことはいうまでもない。放流管等の空洞部周辺の応力集中に対しては、発生する引張応力に対してはこれを全て鉄筋によって補強するものとし、圧縮応力については許容応力を上回る部分についてこれを鉄筋で補強するものとして設計されることが多い。しかし局所的な応力集中は必ずしも全体的な安定性には関係しないから、このような設計方法は安全サイドすぎる設計とも考えられ、この点については今後研究が必要となる。本章ではとりあえず応力集中の算出法と空洞部の大きさが応力集中に及ぼす影響について述べるものとする。

2.2 解析方法

2.2.1 有孔無限板の理論解

放流管周辺の応力集中解析に有孔無限板の理論解を用いる方法は、その簡便さから従来より広く採用されてきたものである。この方法は、一様な応力場にある無限平板内の円形孔または楕円形孔周辺の応力を算出するものであるが、ここでは主として円形孔周辺の応力集中について説明する。

図2.1に示すような無限平板内の円形孔が、y軸方向に一様な一軸圧縮応力 σ_0 を受ける場合、その理論解は、Airy の応力関数を用いて次のように求められる。すなわち、図中の極座標型式を用いると、任意点 (R, θ) の応力は

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{r^4}{R^4} - \frac{4r^2}{R^2} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{r^2}{R^2} \right) - \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{3r^4}{R^4} \right) \cos 2\theta \dots\dots\dots (2.1) \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{3r^4}{R^4} + \frac{2r^2}{R^2} \right) \sin 2\theta\end{aligned}$$

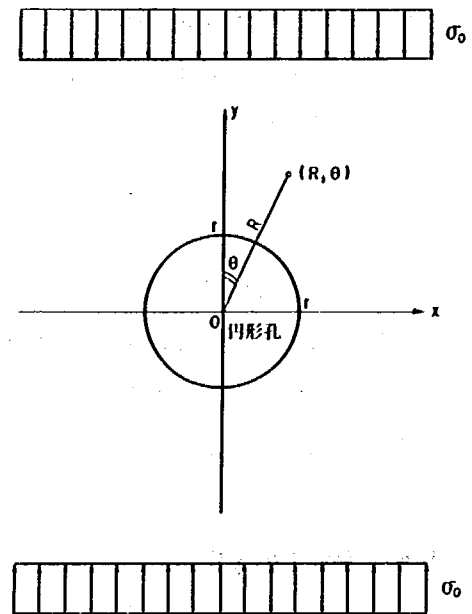
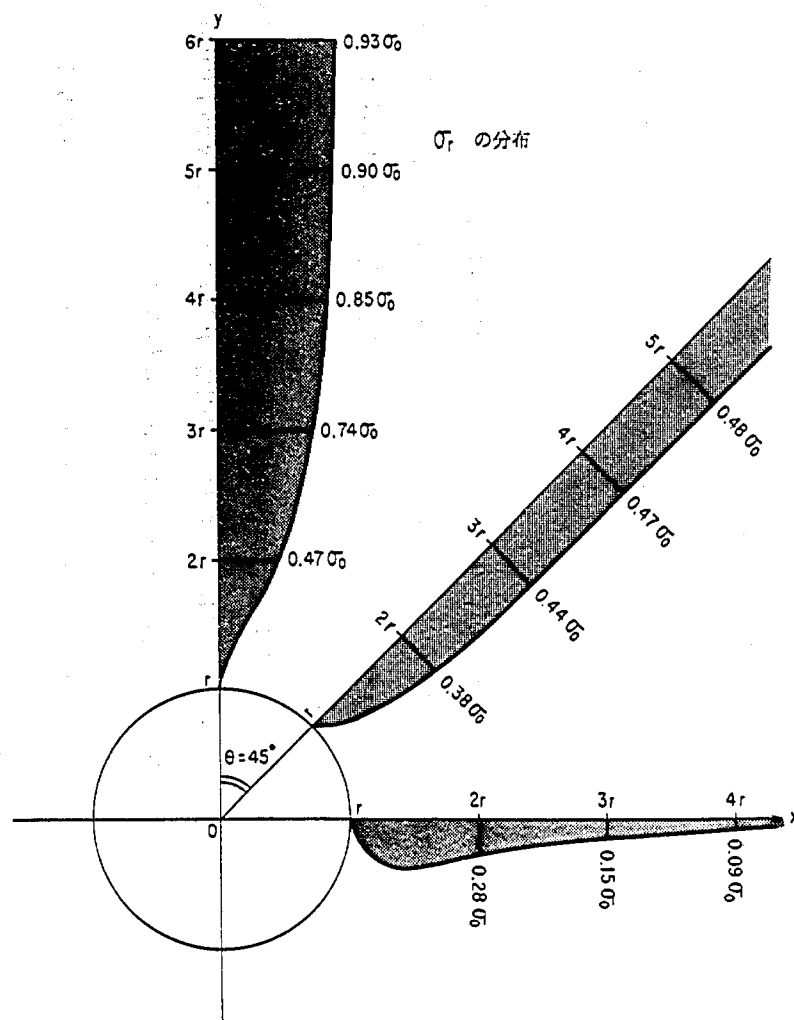


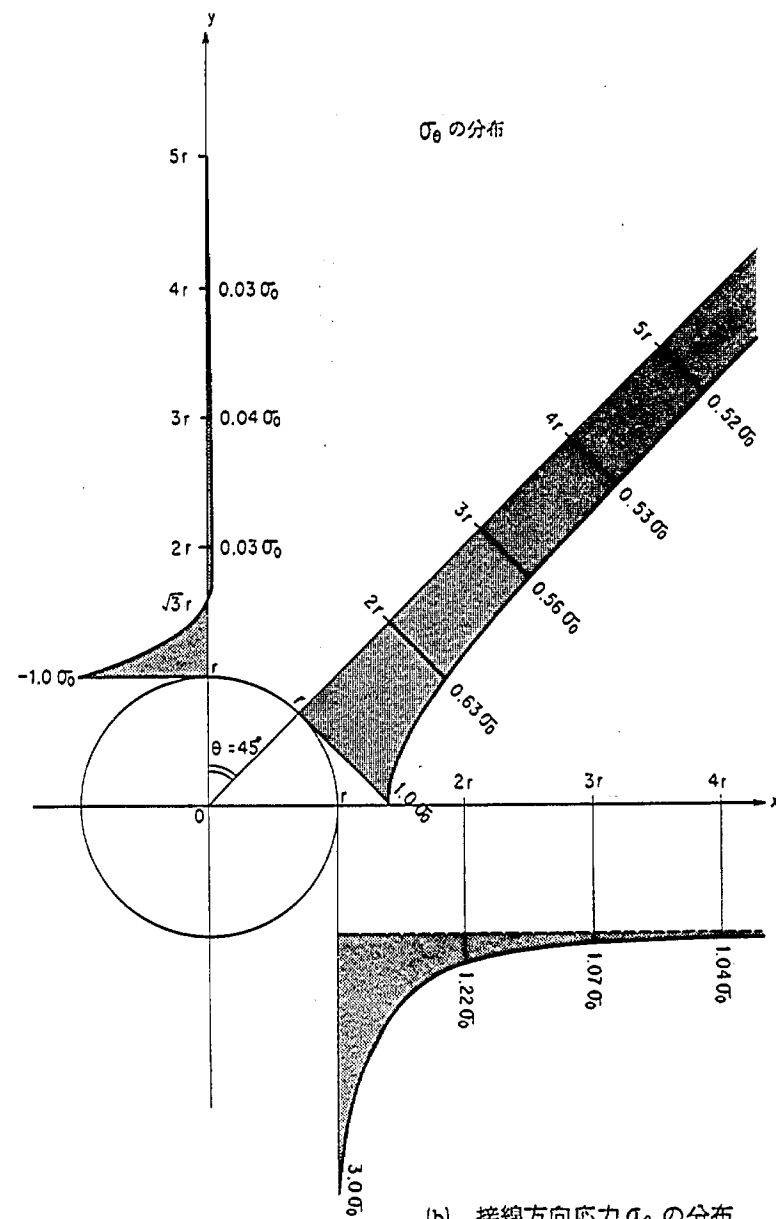
図2.1 有孔無限板

である。ここに r は円形孔の半径である。図2.2には半径方向応力 σ_r 、接線方向応力 σ_θ の分布を示した。

このうち、設計上問題となるのは接線方向応力 σ_θ で、引張応力集中域は y 軸 ($\theta = 0^\circ$) 周辺に生じる。ここで引張応力域は円形孔の上下部 $\sqrt{3} r$ の範囲となり、引張応力の最大値は円形孔沿いの $-\sigma_0$ である。また x 軸 ($\theta = 90^\circ$) 周辺は圧縮の応力集中域となり、圧縮応力の最大値は円形孔沿いの $3\sigma_0$ である。



(a) 半径方向応力 σ_r の分布



(b) 接線方向応力 σ_θ の分布

図 2.2 有孔無限板の理論解（正値は圧縮応力を表わす）

一般にコンクリートでは引張強度を期待しないことから、このような空洞部周辺の引張応力に対しては鉄筋によって補強する必要があるが、その鉄筋量は y 軸上に生じる総引張力から求められる。ここで、y 軸上の総引張力 T は

$$\begin{aligned}
 T &= \int_r^{\sqrt{3}r} \sigma_\theta (\theta - 0^\circ) dR \\
 &= \int_r^{\sqrt{3}r} \frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{3r^4}{R^4} \right) dR \\
 &= -\frac{1}{3\sqrt{3}} \sigma_0 r \\
 &\doteq -0.2 \sigma_0 r \quad \dots\dots\dots (2.2)
 \end{aligned}$$

である。

一方、圧縮の応力集中については、x 軸上において許容圧縮応力 σ_a を上回る領域を r_a とすると、鉄筋で補強されるべき総圧縮力 C は

$$\begin{aligned}
 C &= \int_r^{r_a} \sigma_\theta (\theta = 90^\circ) dR - \sigma_a (r_a - r) \\
 &= \int_r^{r_a} \frac{\sigma_0}{2} \left(2 + \frac{r^2}{R^2} + \frac{3r^4}{R^4} \right) dR - \sigma_a (r_a - r) \\
 &= \frac{\sigma_0 r (r_a - r)^2 (2r_a^2 + 2r_a r - 3r^2)}{2r_a^4} \quad \dots\dots\dots (2.3)
 \end{aligned}$$

となる。いま、 $C > T$ なる条件から r_a ないし σ_a を求めると、

$$\begin{aligned}
 r_a &> 1.383 r \\
 1.67 \sigma_0 &> \sigma_a \quad \dots\dots\dots (2.4) \\
 \sigma_0 &> 0.60 \sigma_a
 \end{aligned}$$

となる。

一般に鉄筋量は総引張力から決定されることが多いが、 σ_0 が許容圧縮応力の 0.6 以上になると、必要な鉄筋量は圧縮の応力集中から求めた値の方が大きくなることに注意すべきである。ただし、圧縮応力に対しての鉄筋量の算出式は安全サイドすぎるとの考えから、両者の鉄筋量に大きな差がない場合には、総引張力から算出した鉄筋量を用いれば十分であると思われる。

また、無限平板内の楕円形孔周辺の応力集中の場合にも、楕円座標を用いて同様に理論解が得られている。この場合、y 軸方向の径を $2a$ 、x 軸方向の径を $2b$ とすれば、引張応力の最大値は、y 軸上の楕円孔沿い、圧縮応力の最大値は x 軸上の楕円孔沿いに生じ、その値は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 \sigma_{(\theta=0^\circ)} &= -\sigma_0 \\
 \sigma_{(\theta=90^\circ)} &= \left(1 + 2 \frac{b}{a} \right) \sigma_0 \quad \dots\dots\dots (2.5)
 \end{aligned}$$

一般に放流管断面は $a > b$ であるから、応力集中の最大値は円孔の場合よりも小さくなる。また総引張力の計算は数値積分によらなければならないが、円孔の場合の r に代って、長半径 a を用いれば安全サイド

の結果が得られるので、便宜的にこの値を用いて(2.2)式を適用すればよいといえる。また総圧縮力の計算では、円孔の場合の r に代って短半径 b を用いればよい。

2.2.2 2次元有限要素法

放流管周辺の応力集中問題を、2次元有限要素法により取り扱う方法は、従来よりいくつか示されてきた。しかし、これらの方法は解析手法が複雑であるとか、あるいは多大な労力を要するなど必ずしも実用的でなかった。そこで、ここでは従来方法に比べ理論が明確で、入力も比較的簡単であり、精度的にも従来のものよりも優れていると思われる方法を示す。理論の概略は、放流管境界部における境界応力を解放することにより放流管周辺部の応力集中状態を再現するものである。以下に手順の概略と本方法に従って行った解析例の結果を示すものとする。(なお、問題が3次元であるのでここで使用する座標系は、図2.3に示す座標系を用いる。)

1) 上下流方向断面(Y-Z面)の2次元応力解析(図2.4(a))

空洞部のない通常ブロックを想定し、2次元有限要素により、上下流方向断面の応力分布を求める。(解析例:図2.5参照)

2) ダム軸方向断面(X-Z面)の面内初期応力の設定(図2.4(b))

解析しようとするダム軸方向断面の面内応力に、1)の解析結果より得られた面内応力(σ_z)を与える。この場合、重力ダムが上下流方向断面に対して“平面応力状態”を有する構造物であると仮定し、ダム軸方向応力 σ_x 、せん断力 τ_{xy} は“0”とする。

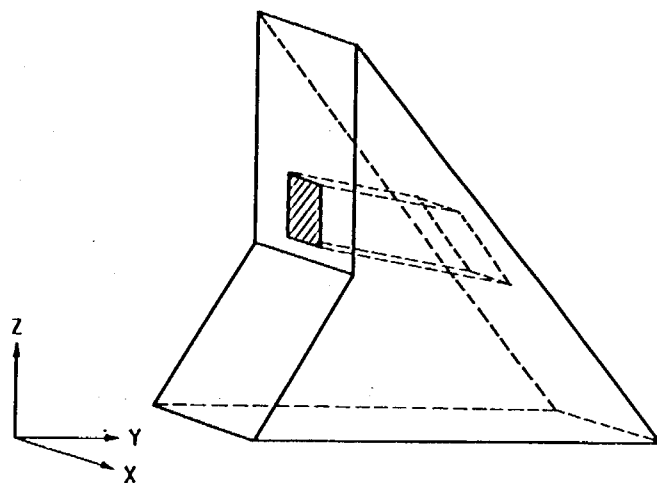


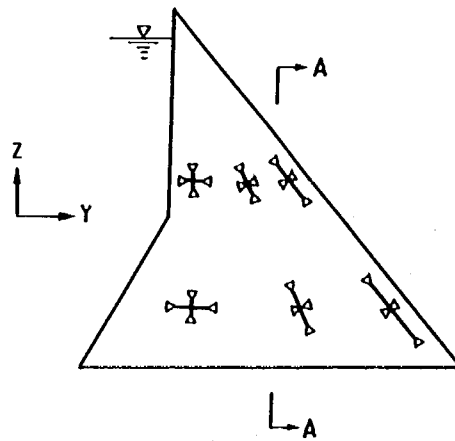
図2.3 座標系

3) 空洞部の効果を与えるためのみかけの荷重の設定(図2.4(c))

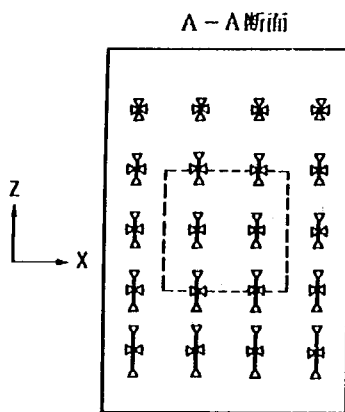
ダム軸方向断面における空洞部の効果を考えると、空洞部の上下境界面は境界面に垂直な方向に拘束されないその方向の応力(σ_z)は“0”である。よって、図2.4(c)の面内応力を与えた状態で前記の条件を満足させるためにその点の応力(σ_z)に等しいみかけの分布荷重 P_1 および P_2 を作用させる。この場合応力(σ_z)は圧縮応力であるから、 P_1 、 P_2 の向きは空洞内部へ向うようになる。(解析例:図2.6参照)

4) ダム軸方向断面(X-Z面)の2次元応力解析(図2.4(d))

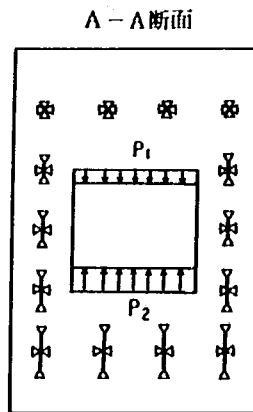
2)の初期応力のもとで3)の応力解を求める。(解析例:図2.7参照)



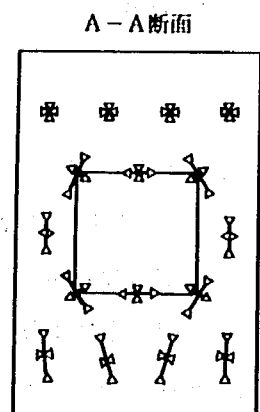
(a) 標準断面の応力分布を求める。



(b) 解析断面に面内
応力を与える。



(c) 空洞部の効果を与えるために
みかけの力を载荷する。



(d) (c)の応力解を求める。

図 2.4 2次元有限要素法による放流管周辺の応力集中計算方法

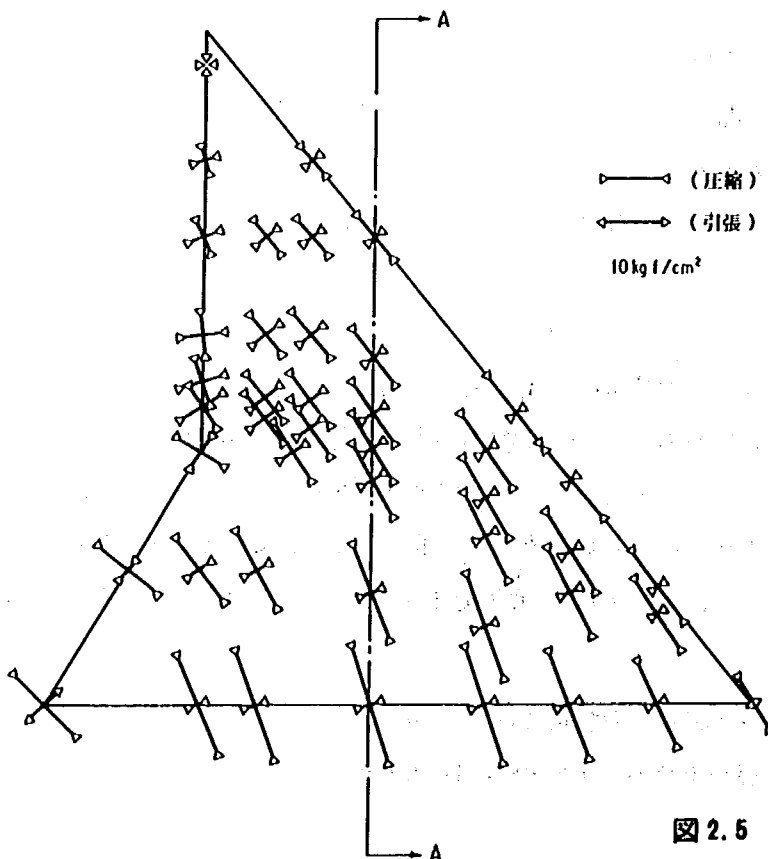


図 2.5 上下流方向断面主応力図

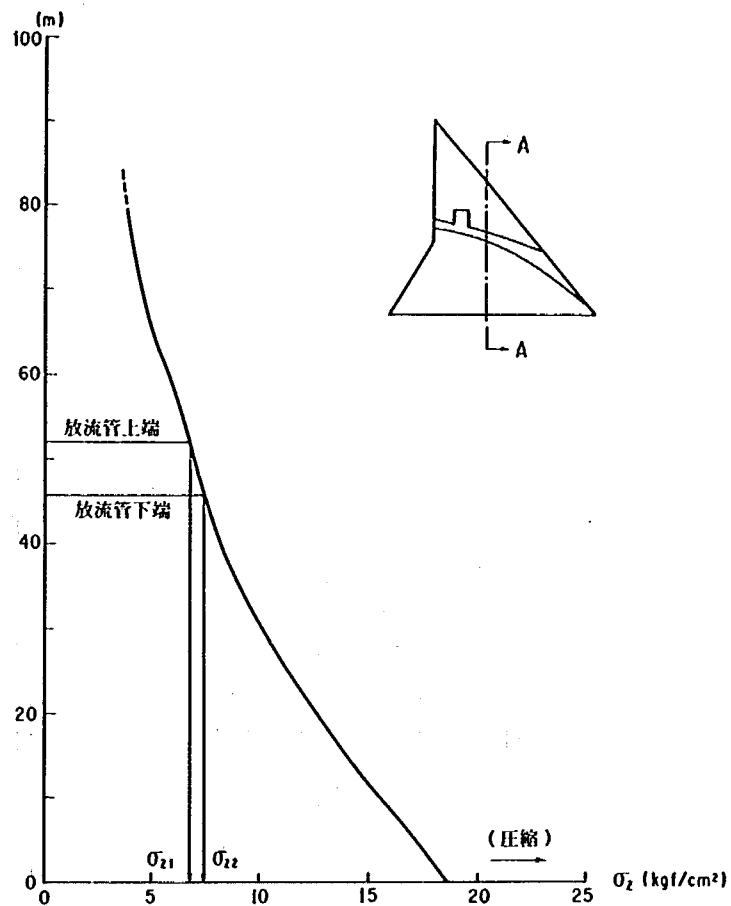
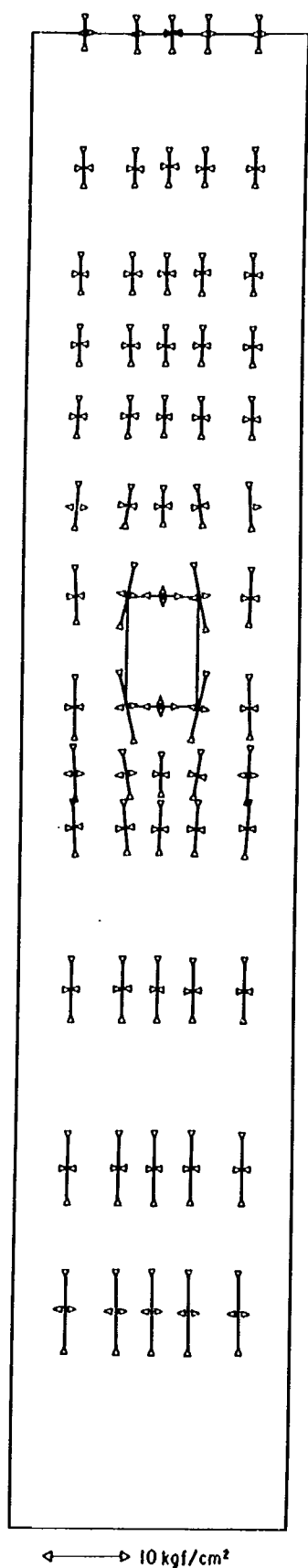
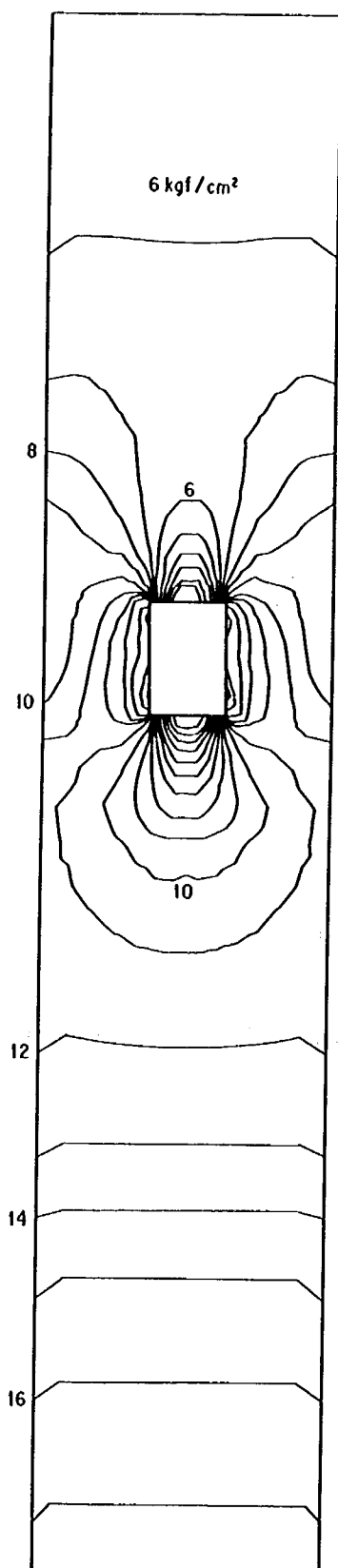


図 2.6 A-A軸上の鉛直応力 σ_z

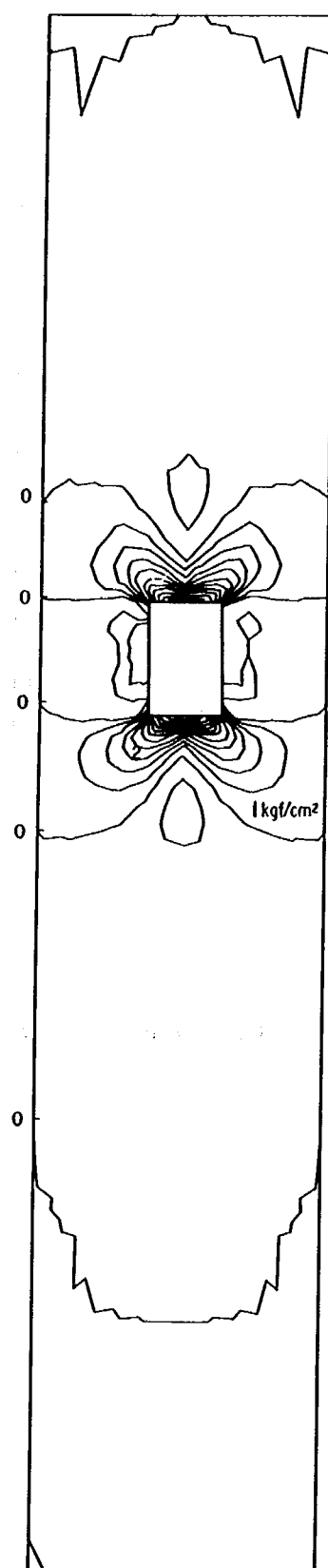
以上が、2次元有限要素法により放流管周辺の応力集中を取り扱う場合の概略手順である。



(a) 主応力図



(b) 第1主応力の等高線図（圧縮を正）



(c) 第2主応力の等高線図

図 2.7 ダム軸方向断面応力解析結果（A-A断面）

2.2.3 3次元有限要素法

3次元有限要素法は、放流管周辺部の応力集中を解く方法として、理論的には最も優れた方法である。しかし3次元有限要素法を用いる場合、計算コスト等の制約により使用要素数が限られることから、実際には精度上の問題が生じてくる。有限要素法の精度は、要素分割の数および要素がもつ変位関数によって与えられる。この解析精度を高めるためには2つの方法がある。その1つは2次元解析における3節点三角形要素、3次元解析における4節点四面体要素（図2.8参照）のように単純な要素を用い、代りに要素分割を細かくする方法であり、もう1つは多節点要素（図2.9参照）のように高次の変位関数を有する要素を用いて少ない要素数で精度を高める方法である。いずれの方法が適当であるかは解析する構造系の形状、応力状態によって異なるが、一般に3次元有限要素法では後者の方法を用いるのが有利とされている。

放流管埋設ブロックの空洞部周辺の応力解析における要素分割例を図2.10に示す。ここでは図2.9に示したような20節点六面体要素、15節点三角柱要素を用いて要素分割を行っている。モデル作成に際しては、

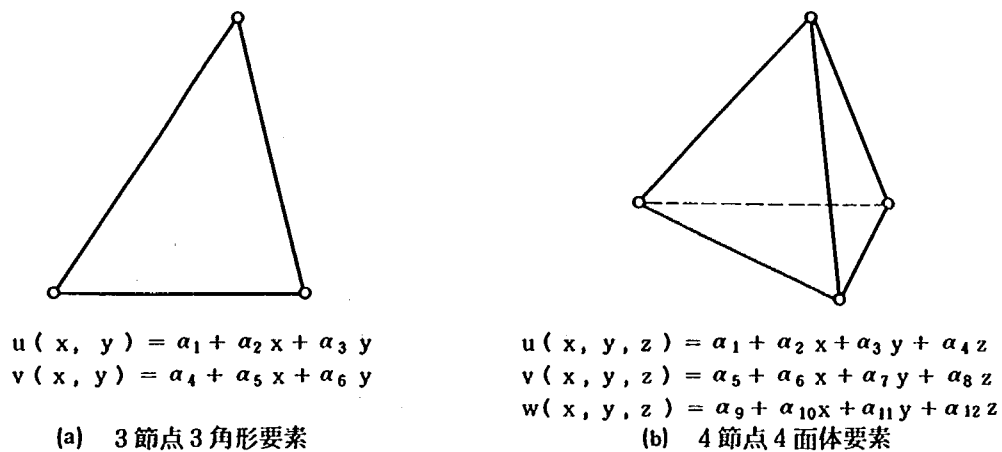


図2.8 定ひずみ要素と変位関数の例

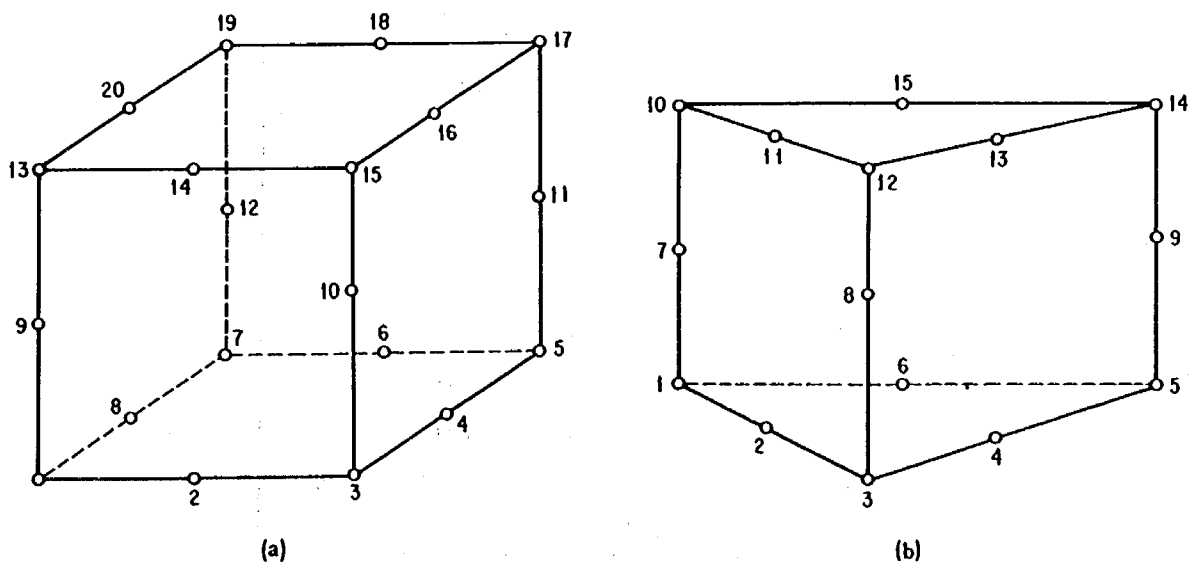


図2.9 多節点要素の例

応力集中を求める空洞部周辺に多くの要素を使用するように努めるべきである。図 2.10 ではモデルの対称性を利用してブロックの半分だけをモデル化しており、また応力集中に及ぼす基盤岩盤の影響は少ないと考え、基礎岩盤はモデルに取り込んでいない。

図 2.11 は解析結果のうち、放流管周辺のダム軸方向応力 (σ_x) を示したものである。

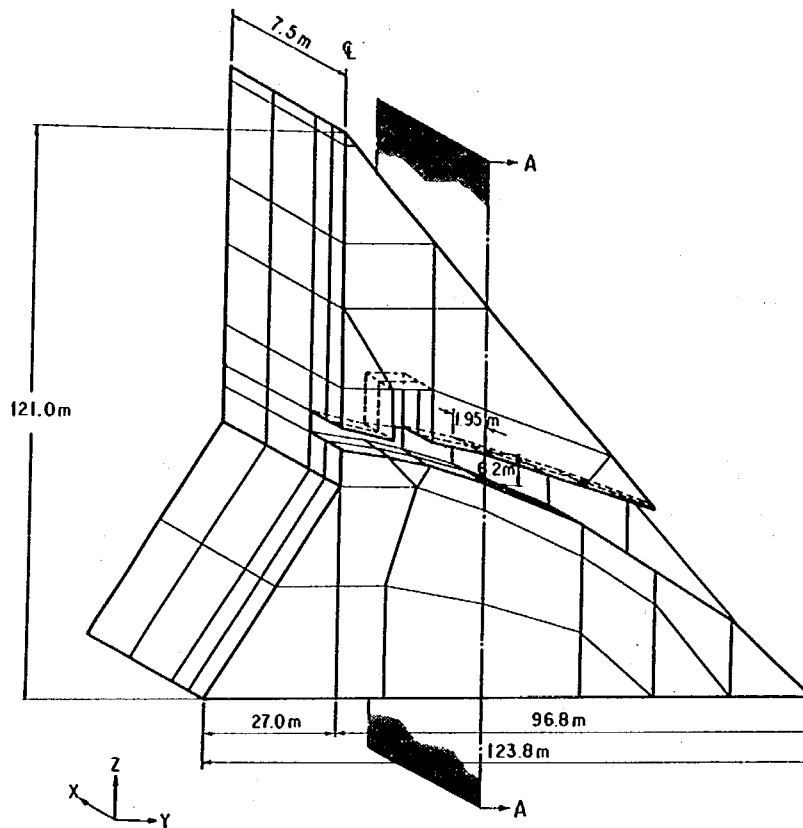


図 2.10 3次元解析モデル

表 2.1 計算条件

堤	高	$H = 121.0 \text{ m}$
貯 水	位	$H_w = 118.0 \text{ m}$
堆 砂	位	$H_s = 43.0 \text{ m}$
上 流 面 勾 配	m	$m = 0.0$
下 流 面 勾 配	n	$n = 0.8$
フ イ レ ッ ト 高	H_f	$H_f = 45.0 \text{ m}$
泥 圧 係 数	C_e	$C_e = 0.6$
コンクリートの単位体積重量	W_0	$W_0 = 2.3 \text{ tf/m}^3$
堆砂の水中単位体積重量	W_s	$W_s = 1.1 \text{ tf/m}^3$
コンクリートの弾性係数	E_0	$E_0 = 2.5 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$
コンクリートのポアソン比	ν_0	$\nu_0 = 0.2$

注) 地震時荷重、揚圧力および放流管内の内圧は含まれない。

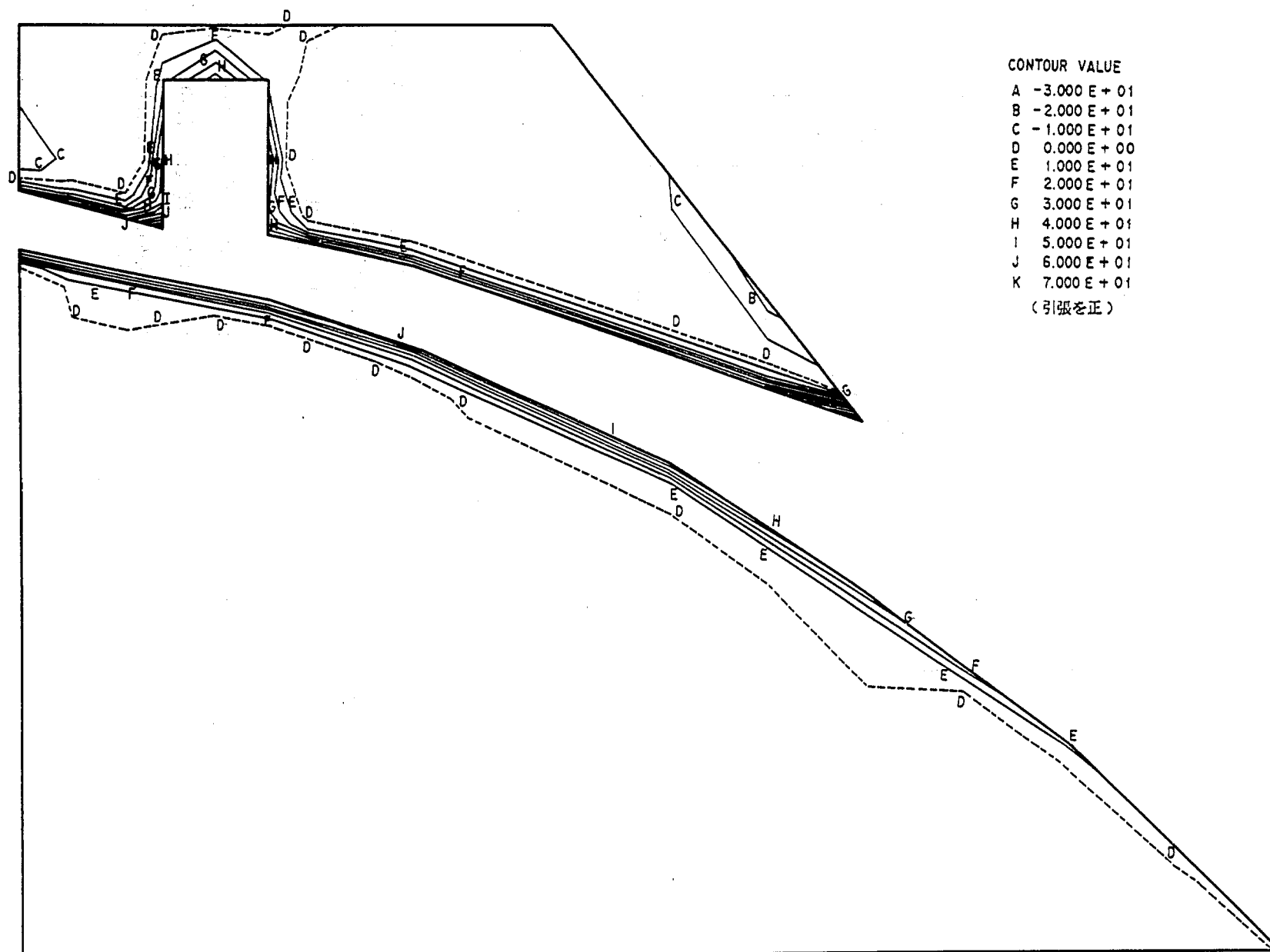


図 2.11 モデル中心軸のダム軸方向応力 σ_x

2.2.4 解析結果による考察

本項では、前述した方法により解析を行った結果にもとづいて各法を比較し考察を加える。解析モデルおよび解析条件は、基本的に2次元有限要素法、3次元有限要素法とも同一とし、図2.12、表2.1に示す。

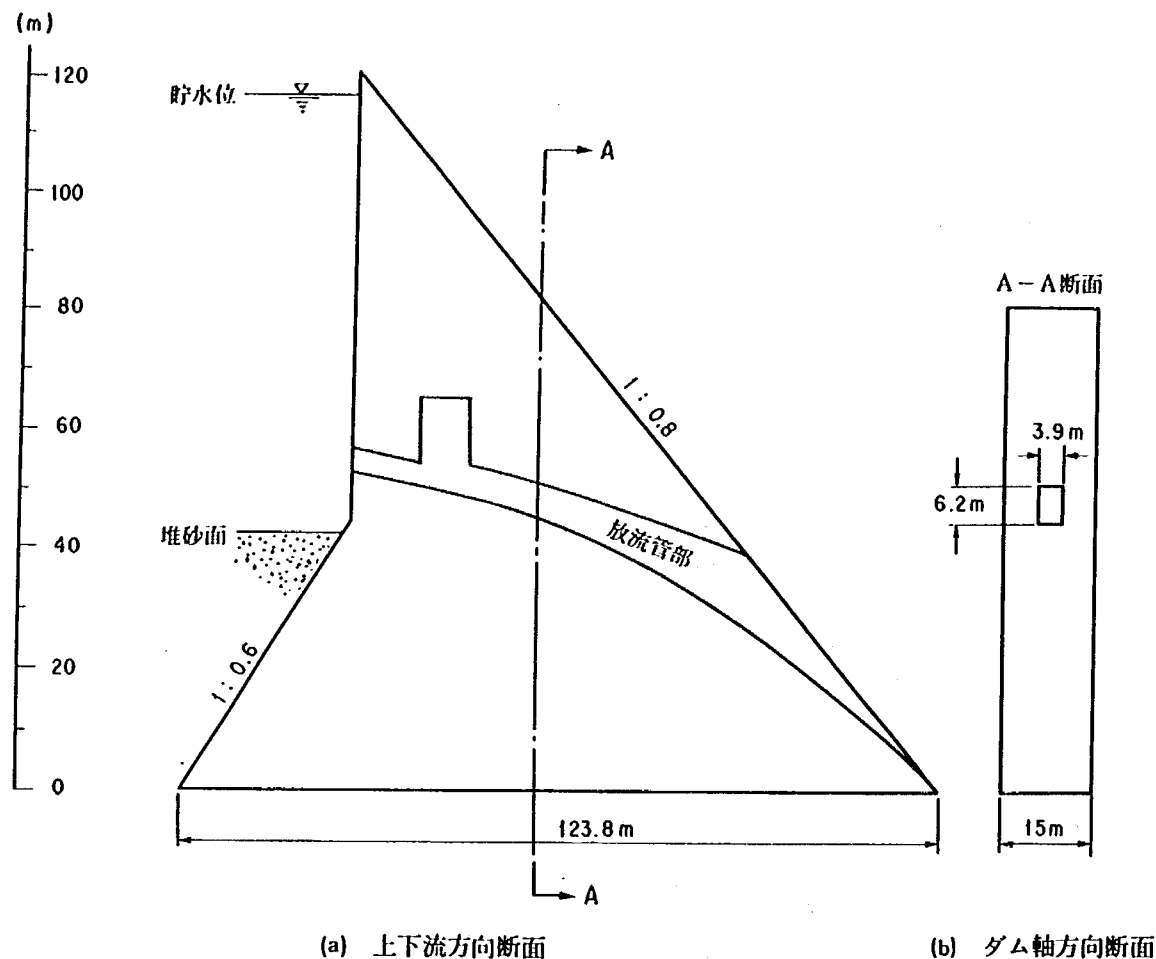


図 2.12 2次元解析断面

解析結果について、2次元有限要素法および3次元有限要素法について比較し図2.13、図2.14に示した。図によれば、3次元応力解析結果および2次元応力解析結果の両者の差異は小さく全体的な傾向はよく一致していることがわかる。したがって、先の2次元有限要素法による方法は、実用上十分な精度を有しているといえる。

次に図2.15に放流管中央部において有孔無限板の理論解、2次元有限要素法、3次元有限要素法の各法により求められたダム軸方向応力(σ_x)について示した。ここで、有孔無限板の理論は、簡単のため放流管の長径をとり円形孔の解を用いている。図より、3方法とも応力分布の傾向は類似しており、いずれの方法も実用上十分な精度を有しているものと考えられる。

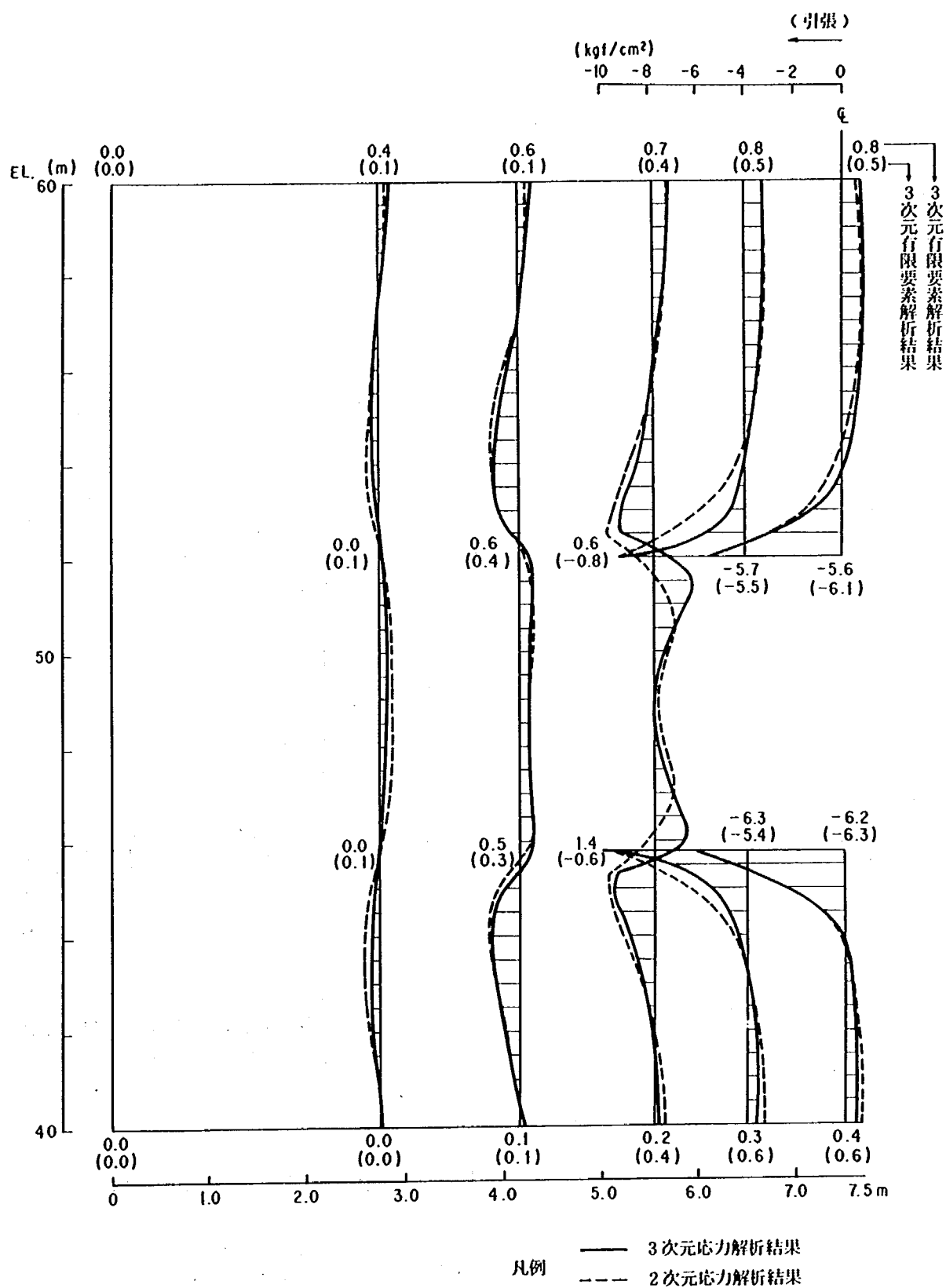


図 2.13 放流管周辺部分のダム軸方向応力 σ_x (A-A 断面)

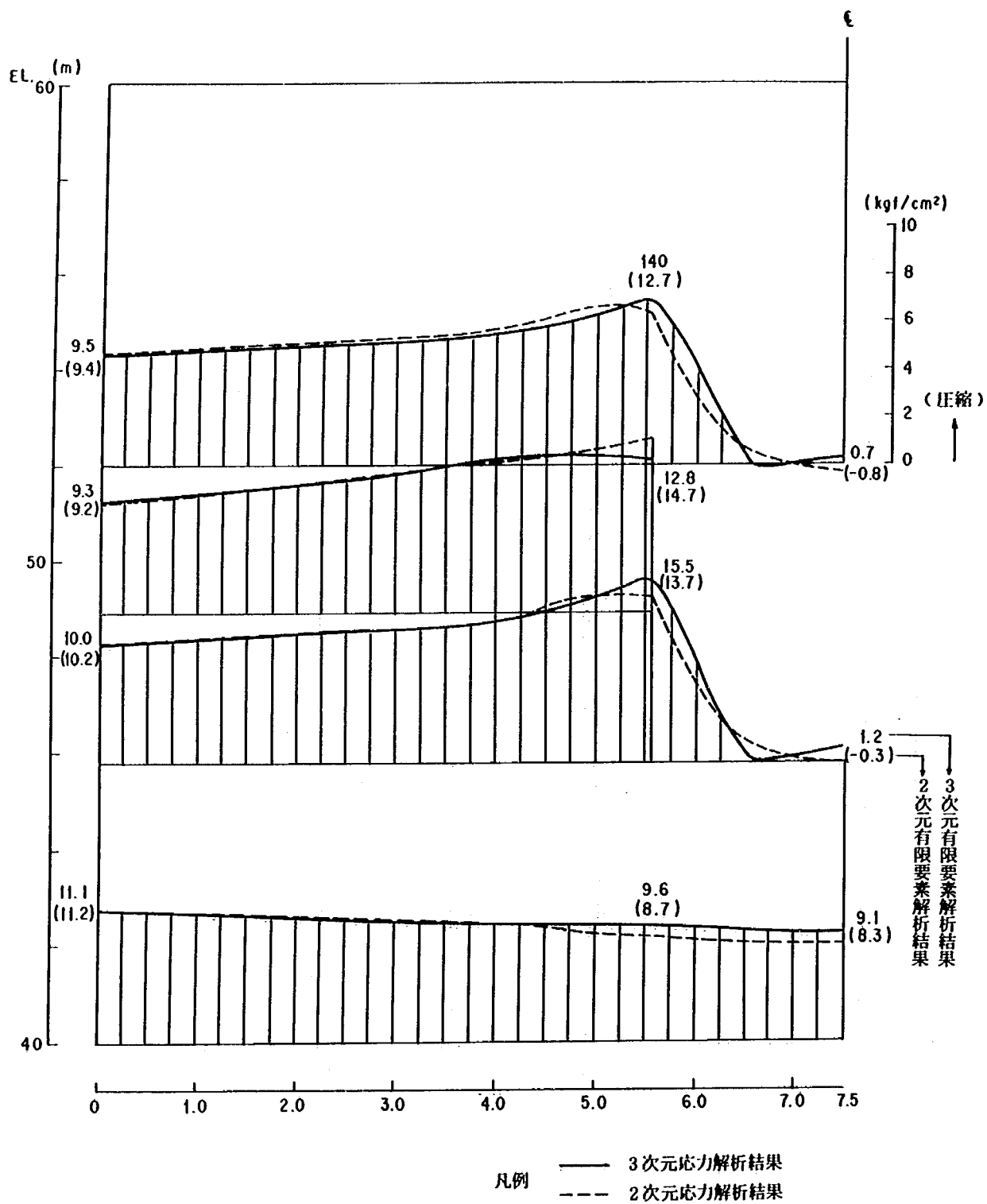


図 2.14 放流管周辺部分の鉛直応力 σ_z (A-A断面)

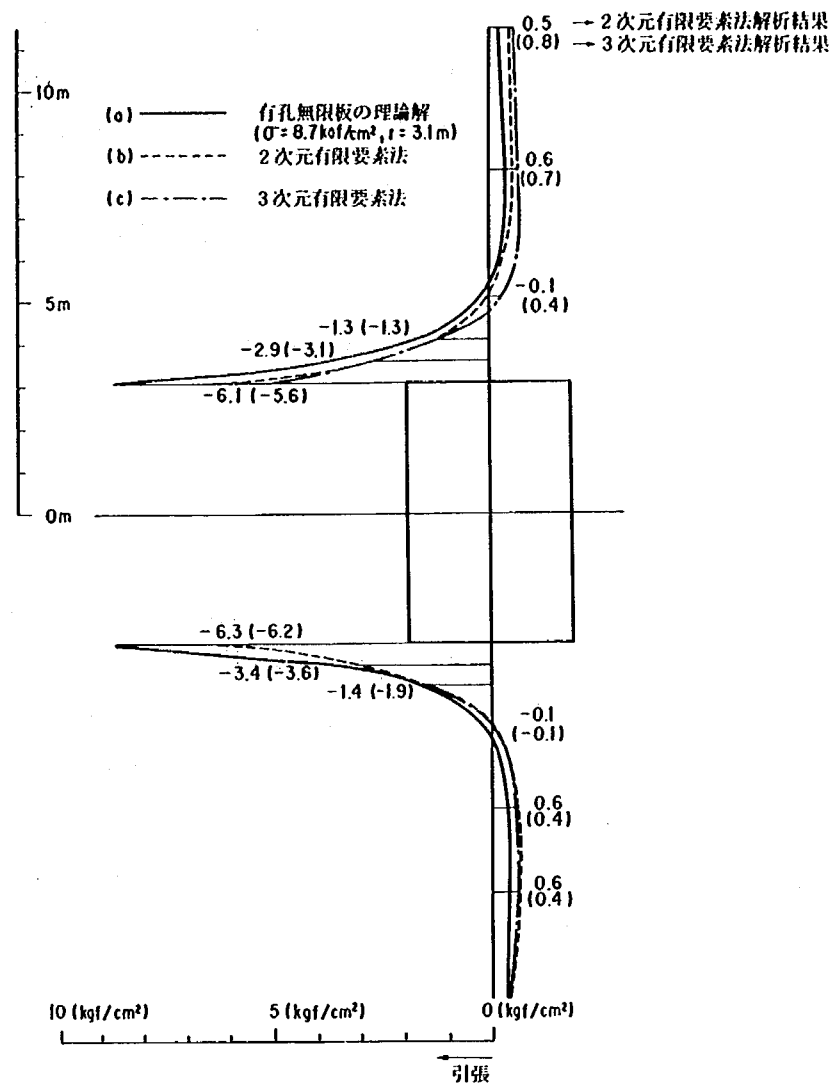


図 2.15 解析手法の違いによる放流管周辺の応力分布の比較

2.2.5 各解析法の適用性

前項までに、放流管等空洞部周辺の応力集中に対する解析方法を3つ紹介し、実際の解析例を通してそれぞれの解析結果の比較を行ってきたが、各解析法はそれぞれ得失を有しており、実際にこれらの方法を用いる際にはその特長を生かし、有効に各方法を利用する必要がある。そこで本項では各方法の特徴と問題点について考察を加えるものとする。

有孔無限板の理論解はもっとも簡便な解析法であるが、これを放流管周辺の設計に採用する場合、問題となるのは放流管の形状と規模に関するものである。このうち放流管の形状に関しては、方形または矩形の断面を有する放流管の場合に考慮すべき問題である。この場合、方形または矩形孔に対する有孔無限板の理論解が得られていないので、特に規模の大きな放流管においては、有限要素法による解析が必要となる。一方、放流管の規模に関する問題は、放流管の径とブロック幅の関係が重要となる。先の理論解は、St. Venant の原理を用い、円形孔の周辺の影響がおよばない程度の大きさの平板を想定したものであり、現実の放流管埋設ブロックのようにブロック端が横継目によって区切られるような断面に対しては、無限

板の仮定が成立しない場合が生じることもある。したがって、放流管の径がブロック幅に対して比較的大きな場合には、ブロック幅が有限である影響を考慮することが望ましい。このような有限幅を有する有孔平板の理論解は Howland, Sjöström によって求められているが必ずしも実用的でなく、有限要素法による解析を行うのが望ましいと考えられる。一般には、放流管の径はブロック幅の 1/3 以内に抑えることが望ましいとされており、やむを得ずこれを越えるような場合には有限要素法を用いた厳密な解析による検討が必要である。

次に、有限要素法全般について共通する問題である解析精度について述べる。すなわち、放流管周辺の配筋設計の際に必要な工学上の精度をどのようにすれば向上させることができるかという点である。これは、有限要素法を用いる場合常に考慮しなければならない問題であるが、放流管周辺のような局所的な応力集中を取り扱う場合には特に重要となる。

有限要素法の解析誤差は、主として各要素の変形特性を変位関数によってあらかじめ与えていることに起因する。この変位関数は使用要素の種類によっても異なるが、一般に 1 次または 2 次の簡単な関数を採用しているために、局所的な応力集中のように複雑な変位分布は、個々の要素では表現できない。したがって、放流管周辺の応力集中のように、応力場が複雑な分布となる場合には要素分割をできるだけ細分化してこれに対応しなければならない。解析モデルの要素分割は、放流管周辺の応力集中域の範囲および応力分布形状と各有限要素が表現できる応力分布を総合的に検討して決定することが望ましい。また、必要に応じて要素分割の粗密を変え、解の収束具合を確認することも大切であるといえる。

図 2.16 に 2 次元有限要素法における要素分割の粗密と応力集中係数および、総引張力の関係について

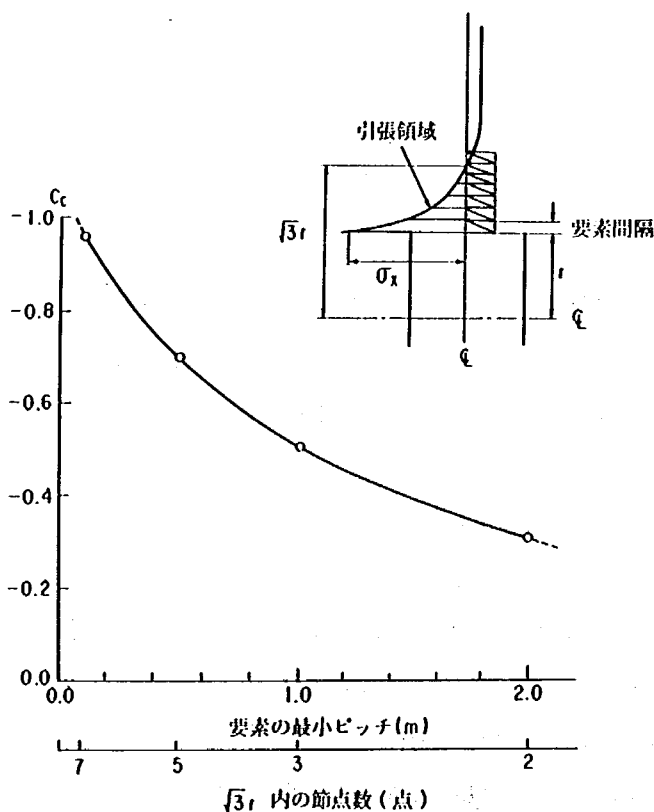


図 2.16 (a) 応力集中係数と要素分割の粗密

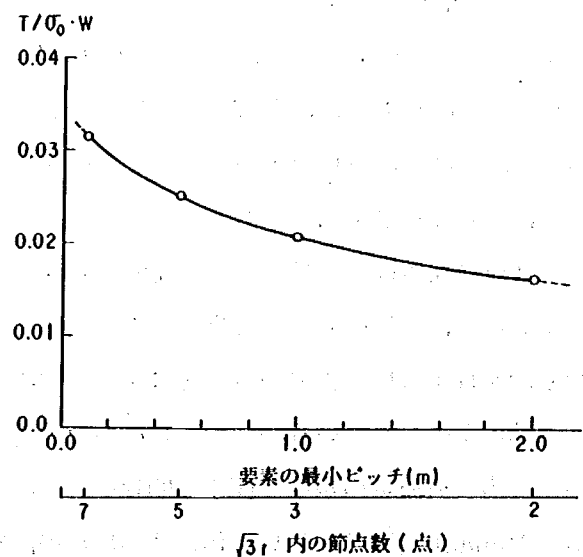


図 2.16 (b) 総引張力と要素分割の粗密

示す。図 2.16 (a) の縦軸の応力集中係数 C_c は放流管上端中央のダム軸方向応力 σ_x を初期応力 σ_0 で除したものである。また図 2.16 (b) の総引張力 T は、初期応力 σ_0 とブロック幅 W で無次元化を行ったものであるが、どちらも詳細な説明を 2.3 で述べることにする。横軸の要素の最小間隔は、放流管直上部の要素の鉛直方向の高さをとっている。また、参考となるよう $\sqrt{3} r$ (おおよその引張領域内) の節点数も併記した。

図より、要素間隔が狭くなると応力集中係数、総引張力ともに精度が向上している。したがって、 $\sqrt{3} r$ 内ではできるだけ要素分割を密にしたほうがよく、5～7 以上の要素分割をすることが望ましい。また、図 2.17 に要素分割の例を示す。

放流管周辺の応力集中のような 3 次元問題を有限要素法を用いて解く場合、前項までに説明した次の 2 通りの解析手法がある。

- ① 3 次元要素を用いて、解析モデルを 3 次的に忠実に表現する 3 次元有限要素法
- ② 3 次元問題を、工学上の精度が許される範囲内で、2 次元問題に還元して解く 2 次元有限要素法

このうち、前者の 3 次元有限要素法による方法は、放流管埋設ブロックにおける 3 次元応力状態を忠実に再現し得ることから、理論上の制約は少ないと考えることができる。しかし、計算機の性能が飛躍的に進歩した現在でも、計算機の容量、計算コスト等の実用上の制約を考えると、3 次元有限要素は 2 次元有限要素法に比べて、精度上の問題があることも否めない。特に、放流管周辺のような局所的な応力集中を取り扱う場合には、解析誤差を小さくするために、相当細かな要素分割が必要となり、これが 3 次元有限要素法を採用する際の支障ともなっている。

一方、後者の 2 次元有限要素法による方法は、応力集中の大きさがこれを求める空洞部周辺部分の応力状態によって定まることを利用して、本来 3 次元状態として解くべき問題を 2 次元状態で近似して解いたものである。この方法は理論上の厳密さには若干欠けるが、2.2.4 で示したように実用上は十分な精度を有していると思われる。また、2 次元解析で、計算機容量、計算コスト等の実用上の制約が少ないことから、要素分割を細かくして解析の精度を向上させることが可能であり、放流管周辺の応力集中に対する配筋設計には有利であると考えられる。

これらの得失を考えると、堤高の低いダム、放流管断面の小さいダムでは、有孔無限板の理論解を代用して配筋設計を行っても差し支えないが、堤高の高いダム、放流管断面等の空洞部が大きなダム等、精度の高

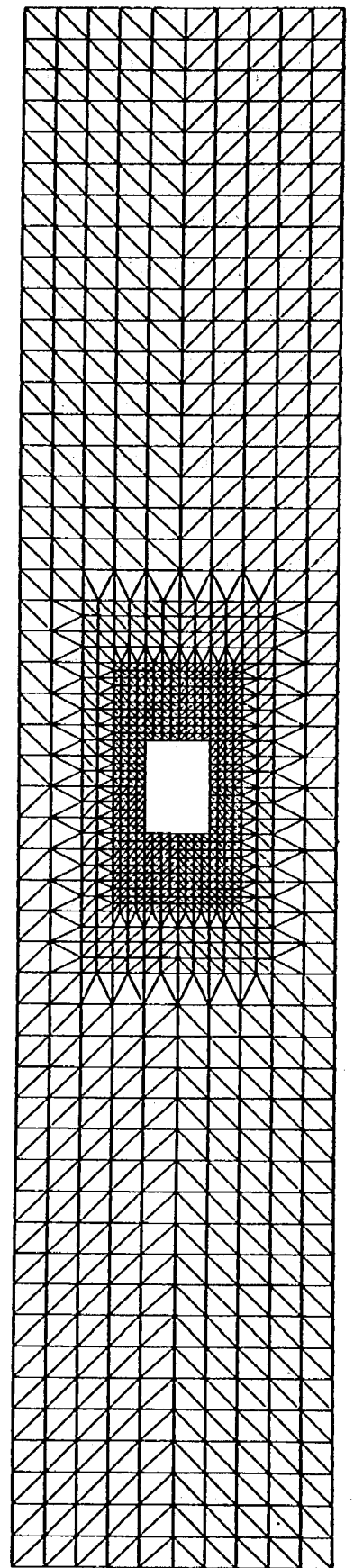


図 2.17 放流管周辺の要素分割の例

い解析が必要となる場合には、有限要素法を用いて解析するのが望ましい。この場合、実用的には2次元有限要素法による方法が有効であり、配筋設計に必要な解析精度も要素分割によって対処することが可能である。3次元有限要素法による解析は、理論的にすぐれた手法であるが、一般的に要素分割を細かくすることが困難なために、配筋設計に適しているとはいえず、堤体内応力の全体的な把握のみにとどめるべきであろう。

2次元有限要素法を用いた解析を行う場合、ダム軸方向の断面をどのようにとるかが問題となる。解析断面のとりかたは、従来安全側を考慮して第1主応力方向にとられていた例があるが、第1主応力方向にとると下流面付近では応力値および放流管断面ともに大きくなり、その配筋量が増大することになる。しかし、3次元応力解析結果(図2.11参照)によると堤体下流面付近では0～1 kgf/cm²程度の応力となっており、第1主応力方向に解析断面をとるのは安全側すぎる設計を行う可能性があると思われる。

2次元解析を行う解析断面の方向を考える場合、これが応力集中を最も正確に求め得る方向であることが必要であるが、その方向について以下に検討してみよう。いま解析断面の方向を主応力方向と異なる方向にとる場合、解析にとり込めない面外方向の応力成分が生じることになる。したがって、最適な解析断面はこの面外応力成分による影響が最も小さくなる方向と考えることができる。そこで、図2.18に示すような空洞部を有する簡単なモデルを考え、空洞部の方向(Y軸方向)に垂直な方向(Z軸方向)と平行な方向(X軸方向)に2.2.2で示したみかけの力を作用させる解析をそれぞれ試みた。その結果を示したものが図2.19である。図より、空洞部の方向に平行な方向に単位荷重を作用させたことによって生じるX軸方向の引張の応力集中の大きさは、空洞部に垂直な方向に単位荷重を作用させたことによって生じるX軸方向の引張の応力集中に比較して十分小さく、実用上無視できると考えられる。したがって、2次元解析を行う解析断面として、空洞部の方向(Y軸方向)に直交する断面(X-Z断面)をとれば、面外応力成分の影響(面外応力成分によるみかけの力を解放することによる影響)をほぼ無視できるほどに抑えることができ、その方向を最も適切な方法と考えることができる。

すなわち、放流管の方向と直交する断面において次式の応力

$$\sigma = \sigma_z \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2(\tau_{yz} \sin \theta \cos \theta) \quad \cdots \cdots (2.6)$$

ここで、 σ : 任意方向の応力

σ_z : 鉛直方向応力

σ_y : 水平方向応力

τ_{yz} : せん断力

θ : 放流管の方向とZ軸のなす角度

を用いて応力解放を行えばよいことになる。

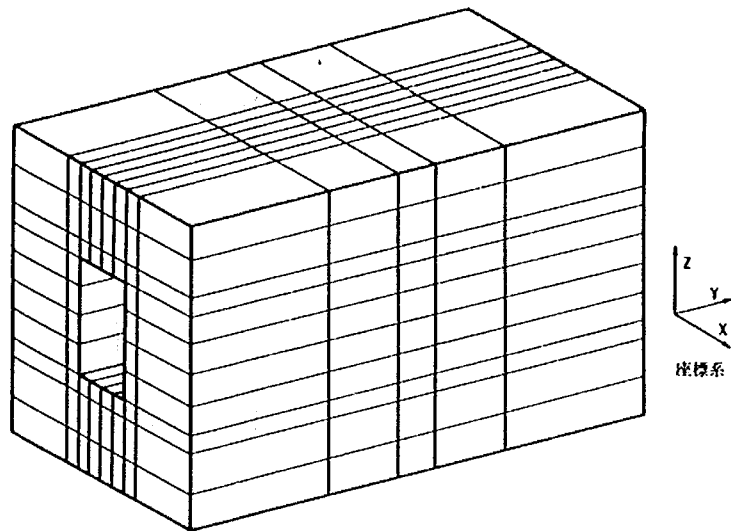


図 2.18(a) 応力解放 3次元モデル

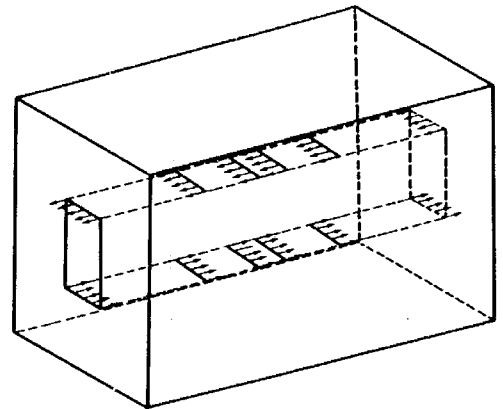
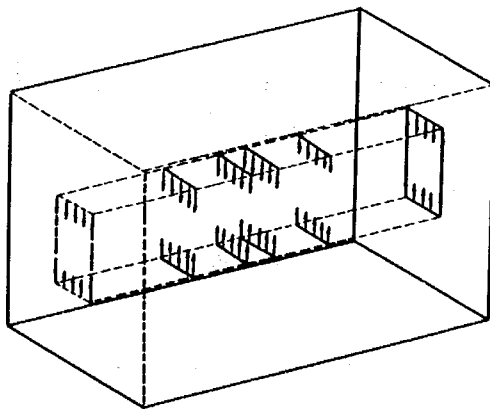


図 2.18(b) Z軸方向に等分布荷重を載荷した場合 図 2.18(c) Y軸方向に等分布荷重を載荷した場合

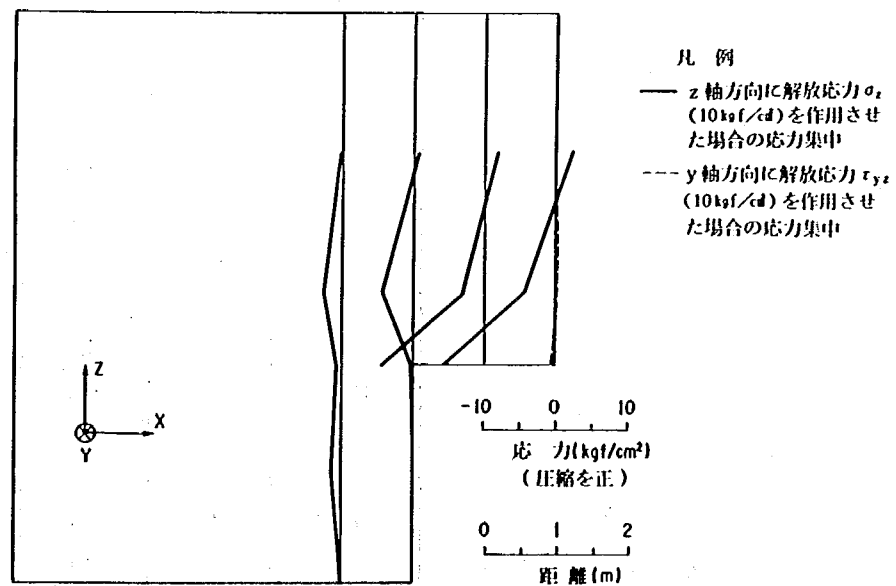


図 2.19 水平方向応力 (σ_x) の分布

2.3 開口部の形状寸法と応力集中

2.3.1 概 説

放流管周辺の応力集中の状態は放流管の形状および規模によって大きく影響される。したがってその設計に際してはこの影響を把握しておくことが肝要といえる。そこで本節では、2次元有限要素法を用いて放流管の形状・寸法と応力集中の関係を取りまとめた結果を述べるものとする。なお以下の解析では、図 2.20 に示したような解析モデルに対し、表 2.2 に示した15ケースの解析を行っている。

2.3.2 応力集中係数

矩形孔の場合の応力解析結果を図 2.21 ～図 2.22 に示す。ここでは、放流管断面の縦横比 b/a および放流管幅とブロック幅の比 a/w をパラメーターとして解析を行った。図 2.21 に放流管周辺の応力分布に関する解析結果の例を示す。応力分布の形状は、有孔無限板の理論解のものとほぼ同様であるが、放流管幅とブロック幅の比 a/w によって、応力集中の程度が変化することがわかる。特に放流管幅が大きい場合 ($a/w = 0.5$ の場合) には、放流管の頂部および側部とも応力集中の程度が大きく、しかも圧縮応力の集中域がブロックの端部にまでおよんでいることから、このような放流管幅は極力避けるべきであることがわかる。次に、各ケースの応力集中の値について、応力集中係数を用いて示したものが図 2.22、表 2.3 である。

$$\sigma_{yA} = \sigma_{yB} = C_A \sigma_0$$

$$\sigma_{xD} = \sigma_{xD} = C_D \sigma_0$$

(2.7)

ここで応力集中係数 C_A , C_D は、放流管の側部および頂底部に発生する応力集中の程度を示しており、解析結果より得られた応力値 σ_x , σ_y を放流管がない場合に発生する応力 σ_0 で除した無次元化された値である。図 2.22 によれば、縦に細長い放流管形状、

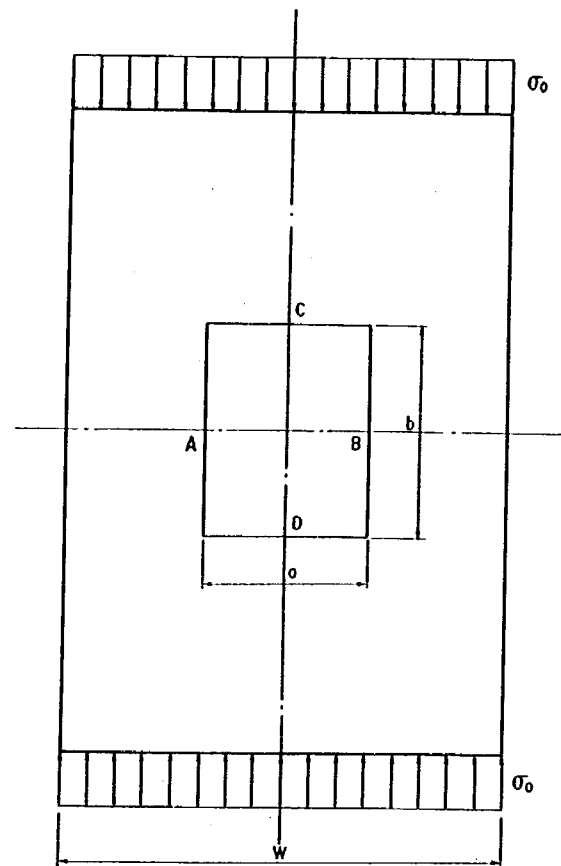


図 2.20 矩形断面の空洞部

表 2.2 計算ケース

ブロック幅 w (m)	放流管幅 a (m)	放流管高 b (m)	a/w	b/a
40.0	4.0	4.0	0.10	1.0
		6.0	"	1.5
		8.0	"	2.0
20.0	4.0	4.0	0.20	1.0
		6.0	"	1.5
		8.0	"	2.0
16.0	4.0	4.0	0.33	1.0
		6.0	"	1.5
		8.0	"	2.0
12.0	4.0	4.0	0.40	1.0
		6.0	"	1.5
		8.0	"	2.0
8.0	4.0	4.0	0.50	1.0
		6.0	"	1.5
		8.0	"	2.0

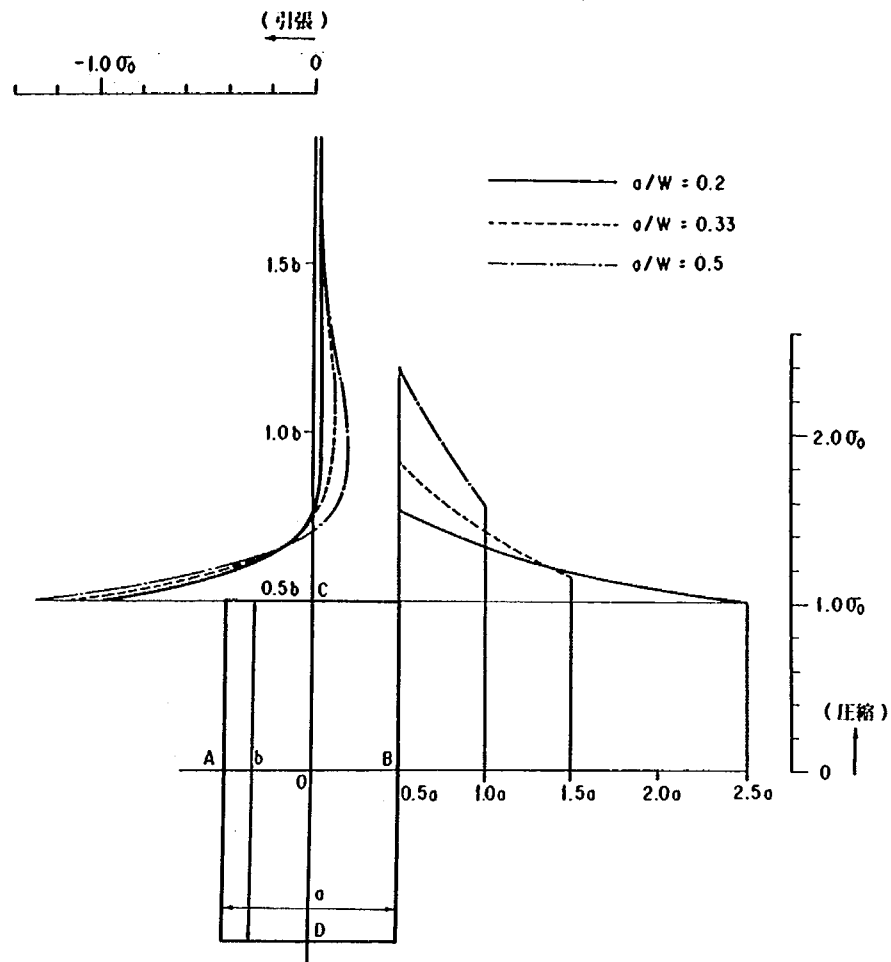


図 2.21 放流管周辺の応力分布 ($b/a = 2.0$)

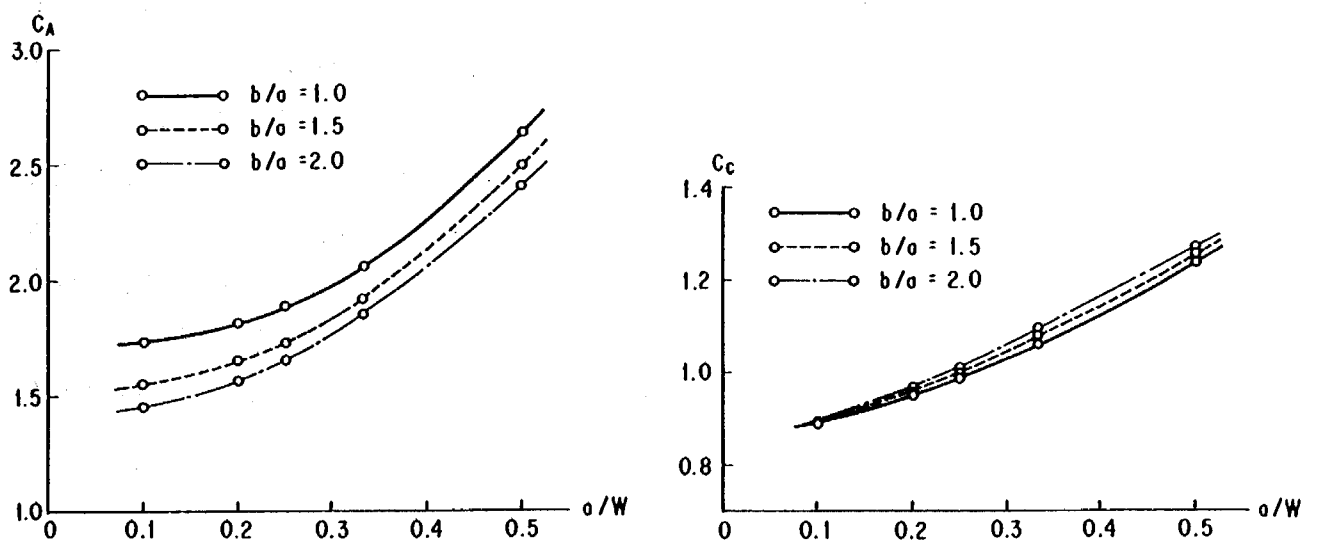


図 2.22 矩形孔における応力集中係数 C_A , C_C

表 2.3 応力集中係数

ブロック幅 w (m)	放流管幅 a (m)	放流管高 b (m)	a/w	b/a	応力集中係数	
					C_A	C_o
40.0	4.0	4.0	0.10	1.0	1.729	-0.893
		6.0	"	1.5	1.548	-0.888
		8.0	"	2.0	1.449	-0.886
20.0	4.0	4.0	0.20	1.0	1.814	-0.950
		6.0	"	1.5	1.649	-0.959
		8.0	"	2.0	1.563	-0.967
16.0	4.0	4.0	0.25	1.0	1.883	-0.988
		6.0	"	1.5	1.728	-1.001
		8.0	"	2.0	1.651	-1.012
12.0	4.0	4.0	0.33	1.0	2.056	-1.064
		6.0	"	1.5	1.918	-1.082
		8.0	"	2.0	1.847	-1.094
8.0	4.0	4.0	0.55	1.0	2.634	-1.241
		6.0	"	1.5	2.488	-1.258
		8.0	"	2.0	2.397	-1.267

すなわち b/a が大きいほど圧縮の応力集中係数 C_A は小さくなる。また引張の応力係数 C_o は縦に細長い放流管形状、すなわち b/a が大きくなると若干増加するが、実用上は b/a の大きさにかかわらずほぼ一定であるといえる。したがって、縦に細長い放流管形状は応力集中の大きさからみる限り問題はないといえる。また放流管幅について見ると、放流管幅とブロック幅の比 a/w が大きいほど C_A 、 C_o とも大きくなり、設計上危険となることがわかる。また、先の有孔無限板（円孔）の理論解と比較すると発生する引張応力の大きさは矩形孔のほうが一般に大きくなる。すなわち $a/w = 0.25$ （ブロック幅：放流管幅＝4：1）より大きい場合は b/a に関係なく応力集中係数 C_o は -1 を越える。したがって、放流管幅がブロック幅の 1/3 を越えるような場合には、注意を有する。また発生する圧縮応力の大きさを有孔無限板と比較すると、放流管が大きい場合でも応力集中係数 C_A の値は 3 よりも小さく、有孔無限板の解析は安全サイドであるといえる。その他、矩形孔の場合は、隅角部付近に大きな圧縮応力（隅角部が直角の場合、理論上は無限大）を生じるので、大きいハンチまたは隅取り円弧を用いて、応力状態を円形孔（楕円形孔）に近づけるのが望ましい。

2.3.2 総引張力

y 軸上に生じる総引張力 T を示したものが、図 2.23 および表 2.3 である。ここで、図 2.23 における総引張力 T は放流管がない場合に生じる応力 σ_o およびブロック幅 w で無次元化を行っている。図 2.23 より、矩形孔の形状（ b/a ）による差異はあまりなく、総引張力 $T / \sigma_o \cdot w$ と放流管幅はほぼ比例関係

表 2.4 総 引 張 力

ブロック幅 w (m)	放流管幅 a (m)	放流管高 b (m)	a / w	b / a	総引張力 T
40.0	4.0	4.0	0.10	1.0	5.457
		6.0	"	1.5	5.564
		8.0	"	2.0	5.665
20.0	4.0	4.0	0.20	1.0	6.031
		6.0	"	1.5	6.318
		8.0	"	2.0	6.564
16.0	4.0	4.0	0.33	1.0	6.347
		6.0	"	1.5	6.670
		8.0	"	2.0	6.927
12.0	4.0	4.0	0.40	1.0	6.863
		6.0	"	1.5	7.186
		8.0	"	2.0	7.396
8.0	4.0	4.0	0.50	1.0	7.531
		6.0	"	1.5	7.738
		8.0	"	2.0	7.847

にあるといえる。また、応力集中係数の場合と同様に放流管幅 a/w が大きいほど総引張力 T は大きくなり、設計上危険側となる。

総引張力の大きさを有孔無限板と比べると、図 2.23 より矩形孔の場合の総引張力の大きさは、その縦横比 b/a の大きさおよび放流管の幅とブロック幅の比 a/w の大きさによらず、概ね

$$T \div 0.2 \sigma_0 a$$

と計算され、放流管幅 b を直径とした有孔無限板として計算すれば実用上十分であるといえる。

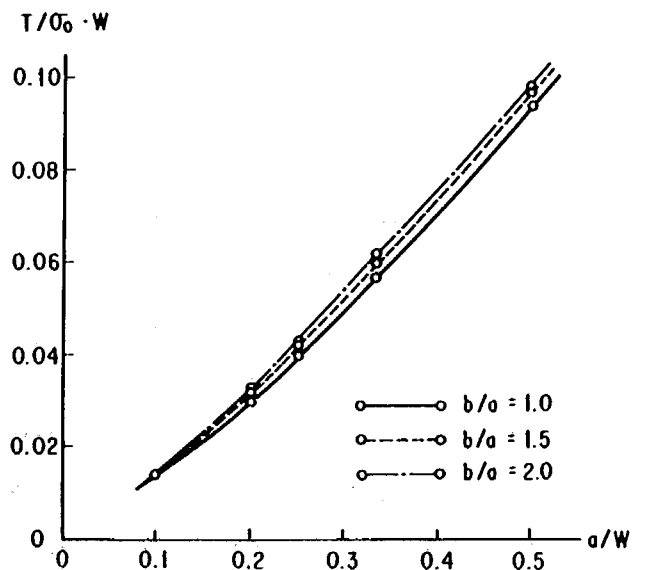


図 2.23 総引張力

ま と め

本報告は放流管埋設ブロック等の空洞部を有する重力ダムの安定解析法について述べたものである。この場合、転倒、せん断、強度といった通常ブロックと同様な安定解析に加え、空洞部周辺の応力集中に対する設計が必要となる。このうち、解析方法が他のものと比べて特殊となる転倒に対する安定性、空洞部周辺の応力集中について、本書で詳しく論じたが、その結果をとりまとめると次のとおりである。

1) ブロック全体の安定性のうち、特に転倒に対する安定性について

- ① 転倒に対する安定性の検討方法には、梁理論による方法と有限要素法による方法がある。
- ② 転倒に対する安定性が最も問題となるのは、その水平断面が下流側に切れ込んだ凹字形の断面となる標高である。
- ③ 梁理論による解析方法は、このような標高における上流面鉛直応力を実際よりも引張側に評価する。このため、放流管等による空洞部の規模が大きな場合には、ダムの断面が不経済となることがある。このような場合、有限要素法による解析を併用し、ダムの断面を検討することが望ましい。具体的な解析方法は1.2.2に示してある。

2) 空洞部周辺の応力集中に対する安定性について

- ① 空洞部周辺の応力集中に対する安定性の検討方法には、有孔無限板の理論解による方法、2次元有限要素法による方法、3次元有限要素法による方法がある。
- ② このうち、空洞部周辺の応力集中状況を正確に表現する方法としては、2次元有限要素法による方法が最も適している。2次元有限要素法を用いた具体的解析方法は2.2.2に示してある。
- ③ 空洞部周辺の配筋計算に必要な総引張力の算出に際しては、有孔無限板の理論解によっても精度よい結果が得られる。
- ④ 有孔無限板の理論解、2次元有限要素法等の2次元解析をするに当たっての解析断面は、空洞部の方向に直交する断面とするのが好ましい。

そのほか、空洞部（放流管）の大きさと、応力集中の大きさ、総引張力の大きさの関係を述べると次のとおりである。

- ① 発生する最大引張応力の大きさは、横継目間隔に比して放流管幅が大きくなると増大する。しかし放流管の高さにはほぼ無関係である。（図2.22参照）
- ② 発生する総引張力の大きさは、放流管幅にほぼ比例して大きくなる。しかし、放流管の高さ、横継目間隔にはほぼ無関係である。

重力ダムの放流管理設ブロックの
応力解析

I S S N 0386 - 5878

土木研究所資料 第2291号

昭和60年12月(1985)

藤沢 侃彦, 永山 功

白閑 茂治, 尾畑 伸之

要 旨

本報告書は、放流管理設ブロック等の空洞部を有する重力ダムの安定解析法について論じたものである。このうち、第1章では、ブロック全体の安定解析法について論じ、梁理論を用いた方法と有限要素法による方法を紹介し、その得失について考察した。また第2章では、空洞部周辺の応力集中について論じ、有孔無限板による方法、2次元有限要素法による方法、3次元有限要素法による方法を紹介し、その得失について考察した。あわせて空洞部の形状、寸法が応力集中に及ぼす影響を検討し、設計の資料とした。

キーワード：重力ダム、放流管、応力集中、有限要素法

郵便はがき

305-□□

40円切手
を貼って
下さい

建設省土木研究所

ダム部ダム構造研究室 行

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2291 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

