

ダム ダム内施設物が堤体の応力分布に及ぼす 影響に関する研究

正員 工学博士 丹 羽 義 次*
准員 林 口 眺 万**

STUDIES ON THE EFFECTS OF SOME INSTITUTES OF A DAM TO THE STRESS DISTRIBUTION IN DAM BODY

(Trans. of JSCE, No. 29, Dec. 1955)

Dr. Eng., Yoshiji Niwa, C.E. Member, Toshikazu Hayashiguchi, C.E. Assoc. Member

Synopsis The effects of inspection gallery, shrinkage gallery, fillets at the heel and toe, modified section of the top, and contraction joint which constructed in the gravity dam to the internal stresses are studied by means of photo-elasticity. On the basis of their experimental results, some standards of design for the gravity dam are made from a mechanical point of view. But the internal stresses are effected remarkably by the various characteristics and conditions of the concrete, so these results should be reconsidered, referring the measuring results on the prototypes of dam in future.

要旨 重力式ダムに設けられる諸施設物の堤内応力に及ぼす影響を光弾性学的に考究した。この実験結果にもとずき、力学的な見地から、重力ダムの設計に対する一つの基準を作成した。

緒言 高ダムを合理的に設計するために、堤内応力に関しては古くから多数の権威者によつて研究が行われてきたが、ダム内施設物が堤体の応力分布に及ぼす影響に関しては、あまり研究せられていない現状である。この点にかんがみ、本研究はこの方面の実験的研究を行い、設計の合理化を計つて一つの基準を作成しようとするものである。ここでは堤内施設物として重力式ダム内に設けられる監査廊、収縮ヒズミ緩和孔、踵跡部、“Fillet”、堤頂拡巾断面、接手部“Key”等を光弾性学的に取り扱つたが、実際にはさらに堤体コンクリートのクリープ、収縮、温度等によりかなりの応力効果がこれに加えられるので、今後の実物ダムの実測結果をまつて、これらの結果は再検討せられるべきであると思われる。

1. 監査廊の周辺応力分布

実物ダムの監査廊周辺に惹起せられる応力は、これに作用する外荷重、物体力の大きさのみならず、コンクリートのクリープ、収縮及び温度等広範囲の影響をうけるので、その算定ははなはだ困難である。ここでは一応鉛直面水圧三角形荷重及び鉛直下方物体力（自重）による周辺応力を実験的に求め、Silverman 及び Hanner 法による計算結果と比較してその適合度を検証し、さらに慣用形孔の周辺応力の概略を把握するための基礎的な実験的研究を行った。

(1) 円形孔の場合 図-1.1 に示す三角形断面の各位置に円形孔を穿ち、各孔周辺の応力分布を求めた。その一例を掲げれば 図-1.2 のようである。これより最大圧縮及び引張周辺応力の大きさとその方向を図示すれば

図-1.1 模型寸法

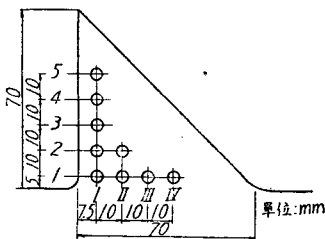
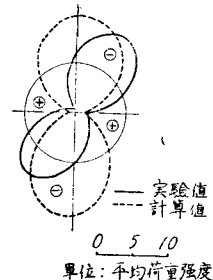
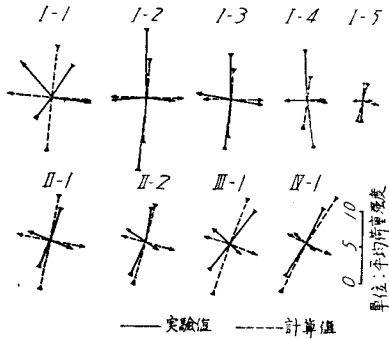


図-1.2 水圧三角形荷重による
1.1 孔周辺応力分布

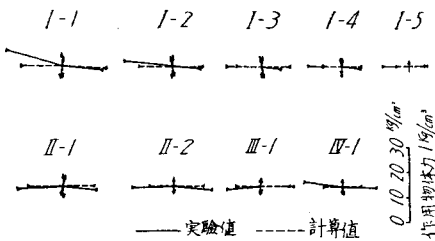


* 京都大学助教授，京都大学工学研究所
** 京都大学工学部大学院研究奨学生，土木工学教室

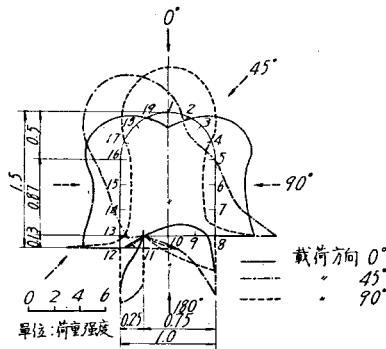
図一.1.3 (a) 各孔周辺最大引張及び圧縮応力の大きさとその方向 (水圧の作用した場合)



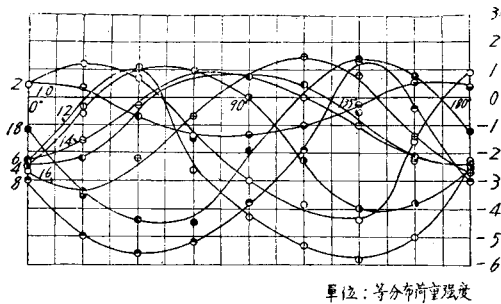
図一.1.3 (b) 同上 (自重の作用した場合)



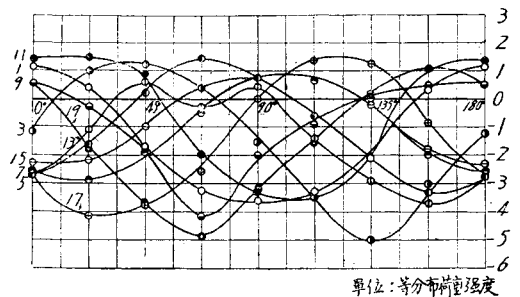
図一.1.4 模型寸法及び監査廊周辺応力分布



図一.1.5 (a) 監査廊周辺各位置における応力と荷重方向との関係



図一.1.5 (b) 同 左



図一.1.3 (a),(b) のようである。なお同図には Silverman の解法¹⁾ による計算結果を破線で記入した。これらの結果から監査廊の位置により実験結果と計算値との相違が大きく変化することがわかるのであつて、水圧の場合一般に I 線上での実験圧縮応力は大きく、堤体内部に入るにしたがつて小さくなつてゐる。また引張応力はいずれの位置においても同程度の値を示している。また踵部及び堤底面付近で最大応力の方向に大きい相違を生じていることに特に注目しなければならない。つぎに自重の場合には一般に実験値は計算値より大きい圧縮応力が惹起せられるようである。これらの結果から Silverman の解法の適用範囲がある程度明らかになる。

(2) 慣用形孔の場合 上には詳細な説明を省略したが、この実験的考察によつて孔のない場合のその点の応力状態を実験によつて明らかにすれば、有孔板の理論 (Hanner 法)²⁾ によつて近似的な監査廊周辺応力分布が求められることが明らかになつたから、つぎに慣用形孔を有する板に種々の方向から等分布荷重を載荷して圧縮実験を行い、その周辺応力を求めた。実験結果の周辺応力分布の一例は 図一.1.4 のようである。いま周辺に定めた 1~19 の点の応力の大きさと載荷方向との関係を図示すれば 図一.1.5 (a),(b) のようになる。この図より明らかなように、点, 8, 11, 12, 等の底部隅角部にはいちじるしい集中応力が惹起され、構造上大きな弱点となるので適当な Fillet を挿入して、応力集中の緩和を計らねばならないことがわかる。またこの部分には 45° あるいは 135° の方向からの圧力によつて、最も大きい応力が惹起せられるので、この方向からの偏圧に対して十分の考慮を払わねばならない。

上述の諸実験結果から Silverman の解法の精度とその適用範囲の概略を把握することができ、さらに慣用形孔の周辺応力分布の推定を行うための基礎実験資料をうることができた。しかし実際応力を推定するためには、今後の実測とさらに詳細な堤体コンクリートの研究によらねばならない。

2. 収縮ヒズミ緩和孔の堤体応力分布に及ぼす影響

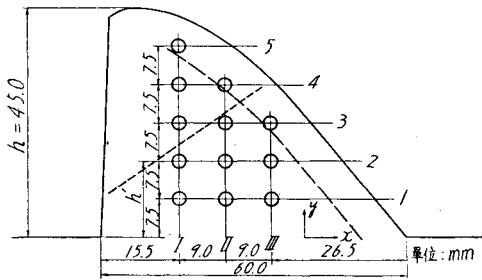
高ダムのコンクリート打設工法を大別すれば、柱状式と層状式に分類することができる。この両工法にはそれぞれ利害得失があるので、近年わが国においては堤体下部を2~3ブロックとし、基礎拘束をうけない上部を層状に打設する折衷工法が考えられるようになってきた。この場合下部のコンクリートブロックの冷却にともなう収縮ヒズミが上部の層状コンクリートに伝達せられ、収縮接手の上端部に応力集中を惹起し、接手の延長方向に亀裂を発生する。それゆえこの部分には収縮ヒズミの伝達を緩和する孔を設けるのが得策と考えられる。このヒズミ緩和孔の効果については後日に譲ることとし、ここではヒズミ緩和孔の堤体応力分布に及ぼす影響について考察する。

一般にコンクリートの収縮による接手の開口にともなうグラウト工が施工せられるのであるが、場合によっては、この接手によって堤体が分割せられ、力学的に一体構造を形成しないと考えられる。このような場合堤体は設計計算とはいじむしく相違した応力状態を呈してその安全度を低下するので、収縮接手及びヒズミ緩和孔が堤内応力分布に及ぼす影響を究明し、応力的に最も有利な位置にこれを設けるようにしなければならない。

それゆえつぎにこの場合最も重要な静水圧荷重による実験結果をあげ、その合理的な設置位置について考察する。

(1) ヒズミ緩和孔の堤内応力分布に及ぼす影響 本実験で対象とした奥泉ダムの模型寸法(縮尺 3/2000)、

図-2.1 模型寸法図



並びにヒズミ緩和孔を設けた位置は図-2.1のとおりである。まず(a)孔がなく鉛直接手が完全にグラウト工によって結合している場合、(b)孔はあるが接手は結合している場合、(c)孔がありしかも接手が開口している各場合の堤内応力状態の比較をII.3位置について示せば写真-2.1(a),(b),(c)の等色線のようなものである。これより堤底に沿う応力分布は(a),(b)の場合ほとんど同じであるが、(c)の場合前二者といじむしくそのおもむきを異にすることがわかる。それゆえ(c)の場合について緩和孔の位置をI-1,3,

5, II-3, III-3に変化して実験を行い、堤底応力の解析を行った。図-2.2(a),(b)にそれぞれの場合の結果を示す。なお比較のために(a)の場合の応力分布を同図に記載した。これより明らかなように開口接手が存在する場合、堤体の一体性は全く阻害され、接手によって分割せられた二つの堤体は、堤底応力分布に関するかぎり

写真-2.1

(a)
光常数 = 11.97 kg/cm
全荷重 = 79.515 kg

(b)
光常数 = 11.97 kg/cm
全荷重 = 79.515 kg

(c)
光常数 = 11.97 kg/cm
全荷重 = 56.883 kg



それぞれ独立した構造系を形成しているのであつて、多くの興味ある事項がうかがわれる。特に上流側構造系下流半分における水平直応力及び下流側構造系上流半分における鉛直直応力分布は注目に値するものであつて、その設計に際し十分の留意が必要である。グラウト工の完璧を期することこそ堤体の一体性を確保する手段であることがここに再確認せられる。

つぎに堤底面に沿う最大セリ断応力の分布を求め、その最少値と孔の位置 h'/h との関係を図示すれば図-2.3のようになる。これより明らかなように接手より上流側ではややいじむしい変化が認められるのであつて、最大セリ断応力の見地からなるべく下流よりにヒズミ緩和孔を設けるのが得策であることがわかる。

図-2.2 (a) 堤体に沿う応力分布 (I-1,2,3)

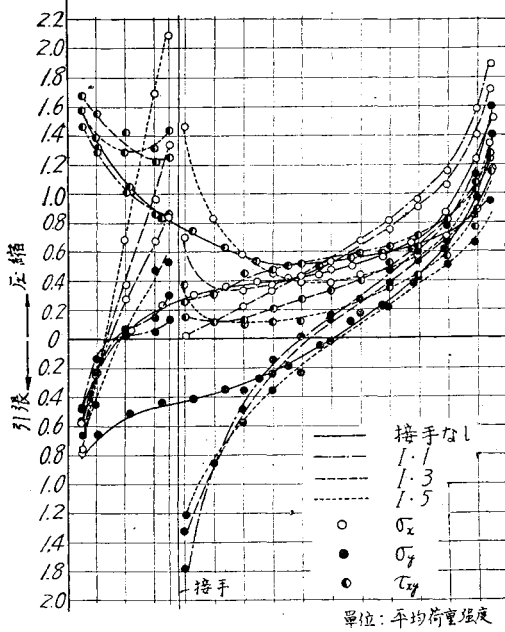


図-2.2 (b) 同左 (I-3, II-3, III-3)

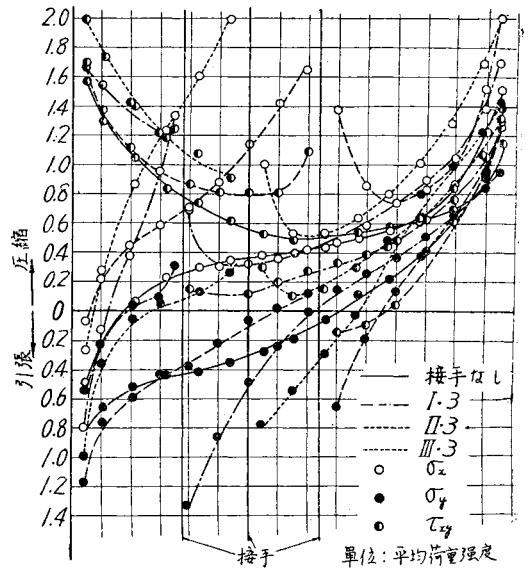


図-2.3 堤底に沿う最大せん断応力の最小値とヒズミ緩和孔の位置 h'/h との関係

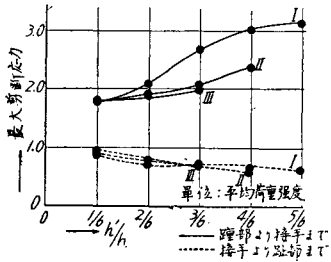
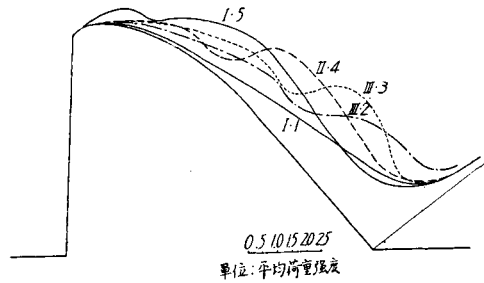


図-2.4 下流面境界応力分布



(2) ヒズミ緩和孔の下流面境界応力分布に及ぼす影響 つぎに I, II, III 線について下流面境界応力を求め、そのうち分布変化のいちじるしい若干の場合を図示すれば 図-2.4 のようになる。これより孔が下流面に近づくにしたがって顕著な応力の集中及び発散を惹起することがわかる。それゆえ下流面境界応力の 見地から合理的な孔の位置を判断する場合、自重その他の外力による応力を加算して考察しなければ 明らかでないが、II-4 及び

図-2.5 ヒズミ緩和孔 (II-3) の周辺応力分布および接手の境界応力分布

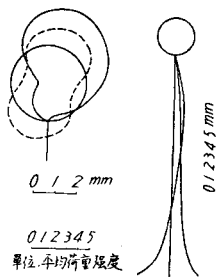
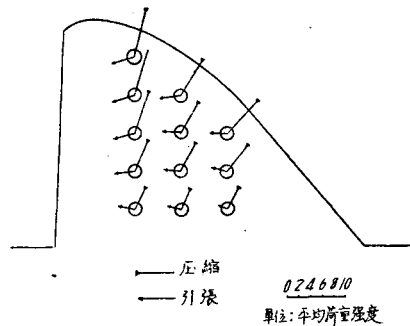


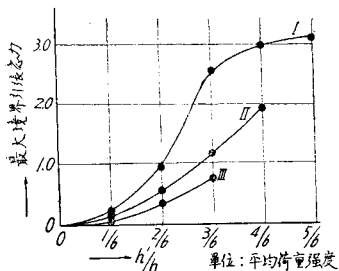
図-2.6 各ヒズミ緩和孔の最大周辺応力 (圧縮, 引張) の大きさとその方向



Ⅲ-3 の位置では集中応力の大きさが趾部付近の応力値より大きくなるので、図-2.1 の破線より下部の堤体内にヒズミ緩和孔を設けるべきであると考えられる。

(3) ヒズミ緩和孔の周辺応力分布 さきに掲げた写真-2.1 (b),(c) のⅡ-3 の場合についての周辺応力分布を示せば 図-2.5 のようである。同図の2つの応力分布曲線(破線はb, 実線はcの場合を示す)を比較すれば、開口接手の周辺応力分布及び大きさに及ぼす影響が明らかになる。これより接手の開口が予想せられる場合、その周辺応力に対して適切な補強を講ずる必要があるように思われる。それゆえいま実験を行った各場合について最大の圧縮及び引張周辺応力値とその方向を一括図示すれば 図-2.6 のようである。いずれの場合も孔が堤体上部にゆくにしたがって最大応力値は増大し、その方向もかなり変化することがわかる。

図-2.7 接手の最大境界引張応力と孔の位置 h'/h との関係



(4) 収縮接手面の境界応力分布 開口接手の上流側ブロック表面に惹起せられる引張応力(図-2.5 参照)と孔の位置 h'/h との関係を求めれば 図-2.7 のようになる。これよりいずれの場合も h'/h が大きくなるにしたがって引張応力がかなり大きくなり、堤体はハリとしての力学的性質を呈してくることがわかる。この引張応力はもちろん堤体の自重による圧縮応力効果によつて緩和または相殺せられるので、緩和孔の位置を考慮に入れねばならないが、図-2.7 より一応 図-2.1 の点線より上部にヒズミ緩和孔を設けることは不利であるように思われる。

上の考察からヒズミ緩和孔を設けるべき領域として 図-2.1 に示した点線及び破線より下部の堤体が応力的に比較的有利であり、さらに施工経済から考えてこの領域の頂点に設けるのが最も得策であるように思われる。しかし実際の設計に際しては(1)で概略を述べた堤内応力分布について十分の考察をする必要がある。

3. 堤体踵部につける“Fillet”の効果

ダムの踵部には Fillet をつけて応力集中の緩和を計らねばならない。従来踵部にあまりこれに対する考慮が払われていないようであり、また踵部の Fillet も主として水理学的な見地からその大きさが定められているようである。それゆえここに直角二等辺三角形断面の堤体に外荷重及び物体力が作用した場合の Fillet の最大境界応力を実験によつて求め、その効果について考察した。

(1) 外荷重が作用する場合 図-3.1 に示すダム模型を作製し、表-3.1 に示すように踵部の Fillet の半径 r と堤高 h の比 ($I.C_u$) を 0.2 とし、踵部のそれ ($V.C_u$) を 1.0~0.1 に変化し、また ($V.C_u$) を 0.1 とし ($I.C_u$) を 2.0~0.2 に変化し、それぞれの場合につき V 側及び I 側に載荷して実験を行った。この場合構

図-3.1 模型寸法図

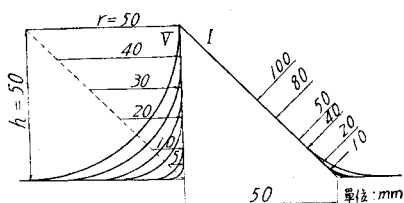


表-3

(1)		(2)	
$V.C_u$	$I.C_u$	$V.C_u$	$I.C_u$
1.0	0.2	0.1	2.0
.8	"	"	1.6
.6	"	"	1.2
.4	"	"	0.8
.2	"	"	0.4
.1	"	"	0.2
実線		破線	

造物内の最大応力に関するかぎり、分布荷重もその合力としての集中荷重も大差がないので、実験の操作上頂点で0である三角形分布荷重の合力としての集中荷重によつて実験を行った。等色線の一例を示せば 写真-3.1, [($V.C_u=0.1$), ($I.C_u=0.2$)] のようである。この実験結果を図示すれば 図-3.2 (作用荷重 1kg の場合の応力値 kg/cm^2) のようであり、これよりつぎのことが明らかになる。

V 側に載荷した場合の最大引張 T 、及び圧縮応力 C 、の集中度 ($V.T.$) 及び ($V.C.$) (単位集中荷重に対する応力値) I 側に載荷した場合の最大圧縮応力の集中度 ($I.C.$) は V 側の Fillet, ($V.C.$) のみはさらに I 側の Fillet の大きさに関係する。これらのうち ($V.T.$), ($V.C.$) は $r/h > 0.5$ または 1.0 の範囲ではほとんど Fillet の大きさに関係なく、 $r/h < 0.5$ または 1.0 の範囲で急増する。($I.C.$) は r/h の減少とともに漸増するようであり、できればかかる構造物には踵部に $r/h=0.3\sim 0.4$ 、趾部に $r/h=0.7\sim 0.8$ の Fillet をつけて応力集中の緩和を計らねばならない。

写真-3.1 $V.C_u=0.1, I.C_u=0.2$



写真-3.2 $V.C_u=0.1, I.C_u=1.2$



図-3.2 Filletの大きさとそれに生ずる集中応力との関係(外荷重が作用した場合)

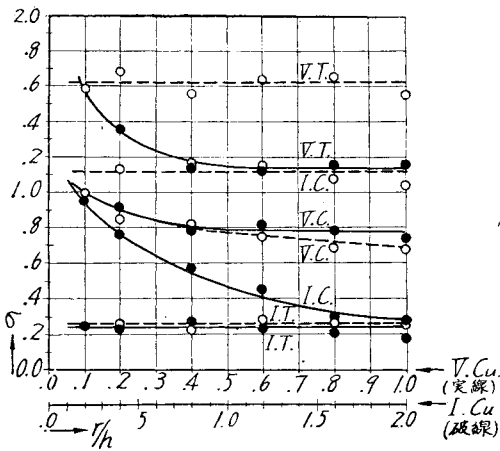
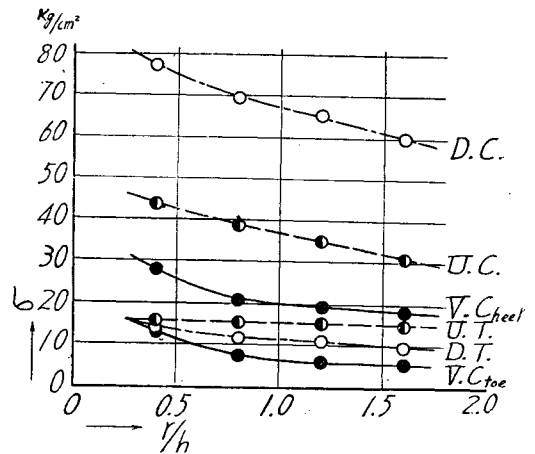


図-3.3 物体力の作用する場合



(2) 物体力が作用する場合 つぎに自重または水平方向地震力が作用した場合の Fillet の効果を明らかにするため、表-3.1 の (2) の場合について高速度遠心力光弾性実験を行った。写真-3.2 は ($I.C_u$) が 1.2 で、下流より上流に向つて水平物体力が作用した場合の等色線である。これらの結果を図示すれば 図-3.3 のようである。ここに応力値 (kg/cm^2) は $1 \text{ kg}/\text{cm}^3$ の物体力が作用した場合の値であり、記号 V, U, D はそれぞれ物体力が鉛直及び上流側または下流側より水平に作用した場合を表わす。まず自重の作用する場合 ($V.C_{heel}$) は ($V.C_{toe}$) よりも大きい、ともに $r/h < 0.8$ の領域でやや急激に増大している。つぎに水平方向に物体力が作用するときには ($U.C.$), ($D.C.$) とともに r/h の増大にしたがって直線的に減少しているが、($U.T.$), ($D.T.$) の変化はきわめて僅少であることがわかる。

以上によつて三角形断面の堤体に外荷重及び物体力が作用した場合の Fillet の最大応力の大きさが明らかになつたが、これらの実験結果を総合して応力集中を十分緩和するために、踵部に $r/h=0.3$ 、趾部に $r/h=0.7$ 以上の Fillet をつけることが望ましいことがわかる。

4. 堤頂拡中の堤内応力分布に及ぼす影響

ダムの基本三角形断面の堤頂に付加せられた拡巾断面が、堤体内応力分布に最も顕著な影響を与えるのは水平地震力をうけた場合である。しかもその安全性を支配する応力は堤底に沿うものと考えられるから、この部分の応力分布と踵趾部の集中応力の大きさについて、主として高速度遠心力光弾性により実験的研究を行った。

(1) 外荷重が作用する場合 模型寸法は 図-4.1 のようで拡巾部下流面は天端で鉛直、下端で基本三角形下流面に接する円弧とし、堤頂巾を種々変化して実験を行った。まず水圧三角形荷重を作用させた場合、踵趾部に惹起せられる集中応力と b/h との関係を求めれば 図-4.2 のようである。これより踵趾部応力は拡巾断面によつて殆んど影響をうけないことがわかる。

図-4.1 模型寸法図

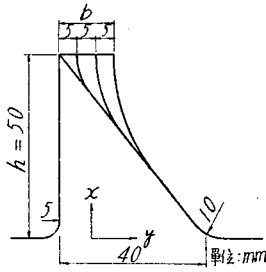


図-4.2 水圧三角形荷重による踵趾部の応力と拡巾との関係

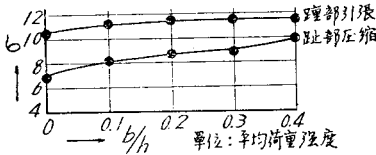


図-4.3 物体力による踵趾部の応力と拡巾との関係

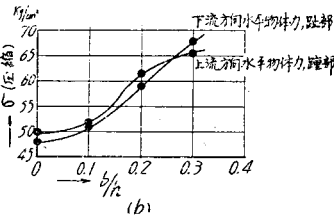
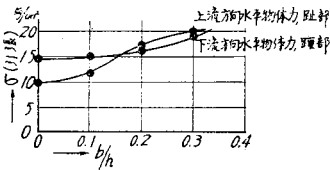
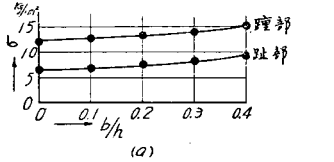
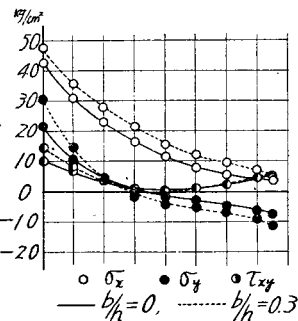


図-4.4 堤底面に沿う応力分布 (下流側より水平方向物体力が作用した場合)



(2) 物体力が作用する場合 つぎに鉛直及び水平物体力を作用させた場合の堤体表面応力分布を求め、踵趾部の集中応力(作用物体力 1 kg/cm^3 によつて惹起せられる応力)と b/h との関係を求めた。これらの結果を図示すれば 図-4.3 (a),(b) のようである。鉛直物体力(自重)の作用する場合拡巾断面が大きくなるにしたがつて、踵趾部応力は緩慢な増加を示している。水平物体力の作用する場合は、圧縮の集中応力は引張の集中応力にくらべていちじるしく大きい。これは基礎に作用する物体力による圧縮効果によるものである。また集中度も $b/h > 0.1$ で顕著な変化を示している。なお下流側より水平物体力が作用した場合の堤底に沿う応力分布を $b/h = 0, 0.3$ の場合について図示すれば 図-4.4 のようである。

以上の結果を総合して堤頂における拡巾断面の大きさは、水平地震力によつて惹起せられる堤内応力の観点から定められるべきものであり、拡巾は $b/h = 0.1 \sim 0.15$ 程度以下にとどめることが望ましいと考えられる。

5. 接手部の“Key”応力分布

ダムを3次元的構造物として取り扱う場合、鉛直施工接手にはKey が設けられる。このKey の形については古来種々論議せられてきたが、まだ結論が与えられていないようである。それゆゑ応力的見地から種々の形状、寸法のKey のセン断試験を光弾性学的に行い、その応力状態を明らかにして、この問題の解決の一助とした。

(1) “Key”底面に沿う応力分布 図-5.1 に示す寸法の模型について、 b/h を $5 \sim 0$ に変化させ、傾斜面に等分布荷重を載荷してセン断試験を行つた。写真-5.1 及び 図-5.2 は等色線及び主応力線の例である。 $b/h = 3, \theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の場合のKey 底面に沿う応力分布(外荷重を 1 kg とした応力値 kg/cm^2)を図示すれば 図-5.3 のようである。これより θ が小さいほど、すなわち基底部が長いほど応力的に有利であることはもちろんであるが、この場合特に載荷側底部隅角部付近の応力状態に注目しなければならないことがわかる。

(2) “Key”隅角部の集中応力 上述の応力分布図から底部隅角部にはかなりの応力集中が認められるので、載荷面と反対側の底部隅角部の集中応力を求め、これと b/h 及び θ との関係(図-5.4 及び 5.5)を明らかにした。これより明らかなように、まず各 θ の値にたいして集中応力は $b/h > 2$ の領域では緩慢な変化をしているが、一般に $b/h < 2$ の領域で急増している。この傾向は θ が大きくなるほどいちじるしいことが認められる。つぎに b/h のそれぞれの値に対しては、一般に θ が大きくなるにしたがつて集中応力を増大するが、 $\theta > 60^\circ$ 及び $30^\circ < \theta < 45^\circ$ の範囲ではその変化の割合が大きくなつていく。したがつて応力集中の見地から b/h が一定であるとき、 $\theta = 30^\circ \sim 45^\circ$ が合理的であると思われる。

上述のKey 底面に沿う応力分布及びその隅角部の集中応力の状態から、Key のセン断に関するかぎり、図-5.6 に示すような接手断面が力学的に有利であると思われる。しかし実際には各ブロックの変形状態は複雑であり、したがつてKey に加えられる外力も不規則なものと考えられるので、実物ダムの種々の実測によつてこの点を解明し、これにもつづいてさらに検討を加えねばならないと思う。

結 語

以上5節にわたる所論によつて、各種堤内施設物の堤内応力分布に

図-5.1 模型寸法図

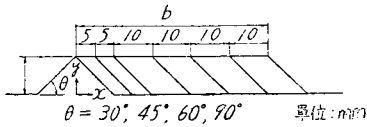


写真-5.1 $b/h=3, \theta=60^\circ$



図-5.2 主応力線図

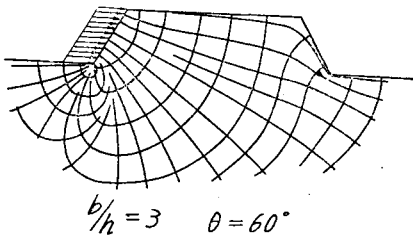


図-5.3 key 底面に沿う応力分布

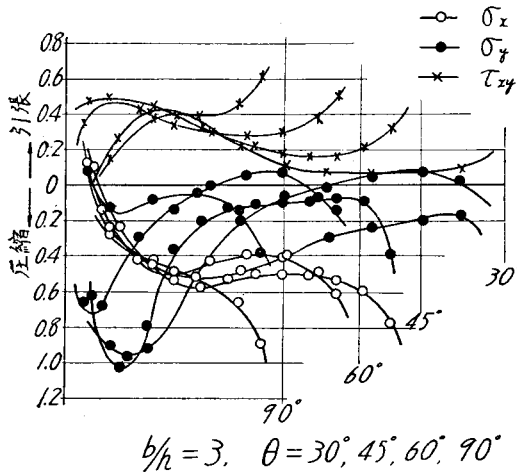


図-5.4 底部隅角部の集中応力と key の長さ (b/h) との関係

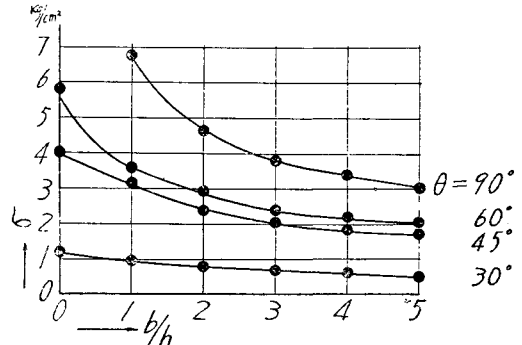


図-5.5 底部隅角部の集中応力と theta との関係

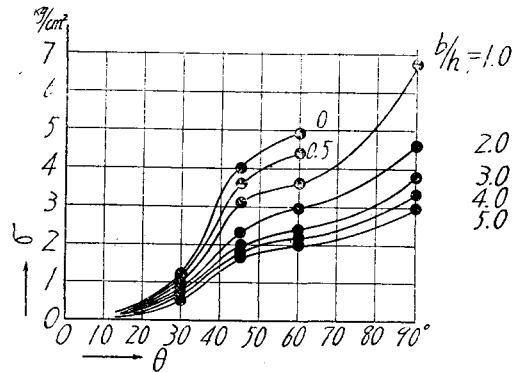
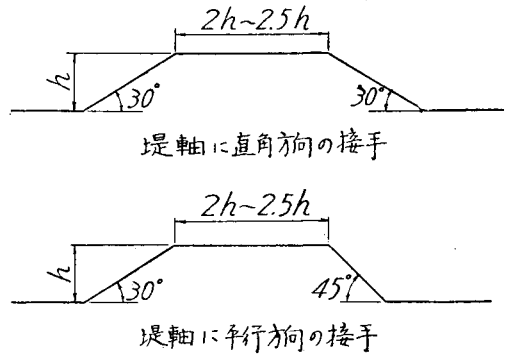


図-5.6



及ぼす影響がかなり明らかになり、一応力学的に合理的と考えられる設計の基準を求めることができた。しかしながら上述のように、堤体コンクリートの諸性質及び状態によつて堤体応力はいちじるしい影響をうけるので、今後の実測結果に基づき、これらの結果に若干の修正を施さねばならないと思う。

本研究は昭和 28 年度建設省建設技術研究補助金の交付をうけて行つた研究の成果の一部である。ここに関係方面に謝意を表する。

参考文献

- 1) I.K. Silverman : Stresses around Circular Holes in Dams and Buttresses, A.S.C.E., Transaction, 1938, p. 133
- 2) F.W. Hanner : Stresses around Circular Holes in Dams and Buttresses, Discussion, A.S.C.E., Transaction, 1938, p. 163 (昭 30.2.8)