

キャビテーション

米国における空洞現象によるダム水理構造物

エロージョン

表面侵蝕の二、三の実例と模型実験

水工研究室長 山 岡 勉

一般に技術界が空洞現象(キャビテーション)の性質に関する現在の理論をいれたのは、近々20数年のことであるが、現象それ自身は新しいものではなく、技術者は長い年数水理構造物における空洞現象によつて生じた表面のピッチング、すなわち侵蝕(エロージョン)を理解していた。ただし日本の土木技術者にとっては概して圧力鉄管などにおけるこの種侵蝕は周知のことでも、実際問題としてコンクリート構造物などに関する被害はまだその問題にされていないようである。米国では近時、実際の必要から越流路の粗いコンクリート表面、越流路・放水工の水車部の阻柱など、ゲート下流のコンクリート床面、ゲート戸みぞ下流のコンクリート壁面などにおける空洞現象による侵蝕の研究は、水理構造技術者にとって実際的かつ重要な研究テーマとなつてゐる。これは日本の土木技術者にとつても関心をほらつてよいことであり、また筆者自身この種水理試験に数ヶ月携わつてきた関係もあり、ここに数例を御紹介したい。

空洞現象¹⁾ この作用の源は蒸気圧に近づくところの大気圧以下の低圧力に降される。流れている液体中のある点の圧力が低下し、その液体の蒸気圧(温度によつて変わり、水の場合は25°Cで約絶対0.5 psi≒0.03 kg/cm²)に近づくとき、液体中から蒸気が遊離し空洞が発生する。この空洞が流れによつて下流へ運ばれ、より圧力の高い部分に達すると押し潰される。すなわち内破する。この蒸気空洞の発生、移行、および崩壊より成立つ作用をキャビテーションという。これは連続的に起こり、空洞の圧潰されるとき固い境界表面に起こる内破に伴う途方もない力は作用が瞬間的なため一瞬強く境界材料の小面積に衝撃をあたら、これをピッチングといい、このため工事材料は、表面に著しいキャビテーション侵蝕をうける。この現象すなわち低圧部分の誘起は、1) 境界表面を流れの正常路より余り急激に曲げてしまうこと、2) 高速流をうける境界表面で不整あるいは不連続を許すこと、3) もし正しく調節されないときはサイフォン作用を生ずる管渠系において極端に高低を変化させること、4) 非流線形物体を高速の液体を流して動かすか、あるいは高速流を非流線形物体の上に通過させること、5) 流水面積を余り急激に流れの方向に拡大すること、など

が原因となる。

その起因に関らず、キャビテーションは境界表面をひどく損傷するので不安定な操作状態が構造物の弱体化を引き起しやすい。またぼんぼんといひばりばりという騒音(クレピテーション)が伴い振動が常に生ずる。侵蝕の特徴は多くの細粒がピック・アップされたような被害で噴射(ジェット)による侵蝕とは全く別なことがわかる。

構造物における空洞現象の防止について²⁾ 現在の技術的知識と経験をもつてキャビテーションの起らない形状の設計を、計算のみで達成することは不可能であるが縮尺模型の水理的試験研究あるいはこの目的に対して造られた特殊装置によつて適当な観測を進めることによつて行なうことは可能である。既設構造物のこの現象の改善には、1) 厳格な運転操作制限を設ける、2) その液体の蒸気圧以上の値に圧力を増加させるために低圧部分に空気を供給すること、3) 流水路の全部または一部の変更、4) 直接高速流に接触する部分の流線化、5) 侵蝕面積内により抵抗力のある材料を周期的におく、あるいは、6) 自然に終息するまでピッチングを続けさせるなどが考えられる。

空洞現象に対する模型実験³⁾ 設計中の構造物における空洞現象の予想のためには、模型実験が必要だがこれには2種の方法がある。1) 普通の大気圧のもとで縮尺模型で行なわれる水理実験で、測定された圧力強度とその分布を検討して実物ではどの部分にキャビテーション

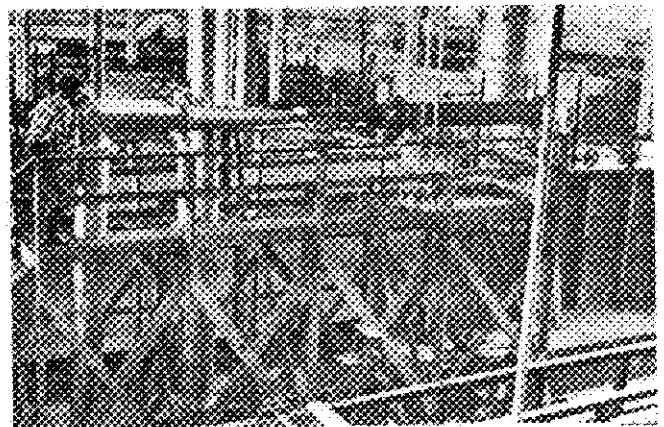


Fig. 1 米岡開拓局 (U.S.B.R.) キャビテーションの水理試験装置全景 (筆者撮影)

がおとるかを予測するわけである。勿論模型では流速も縮尺されるからキャビテーションは起こらない。自由水面のない場合は水の代わりに空気を使つて実験すれば、迅速で経済的である。2) キャビテーション試験用低圧水槽装置の中に模型を入れて大気圧以下の圧力で実験を行なう。Fig. 1は米国防探水理試験所の例である。この場合大気圧試験よりもつと複雑であるが、キャビテーションが起こるかどうか、また表面の圧力分布がキャビテーションの出現にどうであるかに関する決定を簡単にする。1:14の模型縮尺と28ft水頭の大気圧力を用いれば、水槽内の圧力すなわち模型大気圧力は絶対対2ft水頭でなければならぬであろう。水槽中への空気のもれはこの型の試験における固有の困難さである。圧力測定は空気化と要求される特殊の装置のためにより困難となる。勿論この方法では実際にキャビテーションが模型に生ずる。キャビテーションの振動とエネルギー損失効果はこの方法で一番よく研究される。試験部分の圧力は、大気圧以下の種々の圧力に調節できる。

空洞現象問題では模型と実物の「キャビテーション係数」 K の値を等しくすることにより、模型にキャビテーション状態を複製することができる。 K には多くの形があるがその一つは、 $K = (P_x - P_v) / V^2 / 2g$ 、ただし P_x は流体のある1点における圧力、 P_v はその流体の蒸気圧であり、また V はその関係点における流速である。米国では P_x と P_v は大気圧を基準にした水頭ftで表わし、 V はfps、 g は32.2である。 K の値が次第に下つてゆくと空洞現象が起こるわけである。

工事材料、特にコンクリートの侵蝕抵抗¹⁹⁾のキャビテーションによる工事材料の侵蝕は、それらの磨耗抵抗を決めるのに広く用いられ、金属には磁力式緊張マシンレークが効果的装置で、ツェンチャリ型水路でその他の工事材料、コンクリート、ゴムなどが試験される。磨り回気ディスクもその中または上に小さな障害物をもち、キャビテーション誘導に用いられる。コンクリート表面の侵蝕は、流水による研磨材料の動き、交通の摩擦と衝撃、砂の吹きつけ、流水の衝撃および空洞現象が主要原因だが、このうちキャビテーションにはコンクリートの品質に無関係にごく僅かの抵抗しか供さない。したがつてそのコンクリート構造物の適当な設計、施工および操作によつて被害を防ぐよりほかにない。

ダム越流部などの粗いコンクリート表面の空洞現象侵蝕²⁰⁾ Grand Coulee ダムでは越流路表面の型枠が外方へふくれて5ftリフトの少なくとも1つには約3inのハニツ(ふくらみ)ができた。約9季節の運転の後越流後面を検査すると、そのハニツの下流のコンクリートは

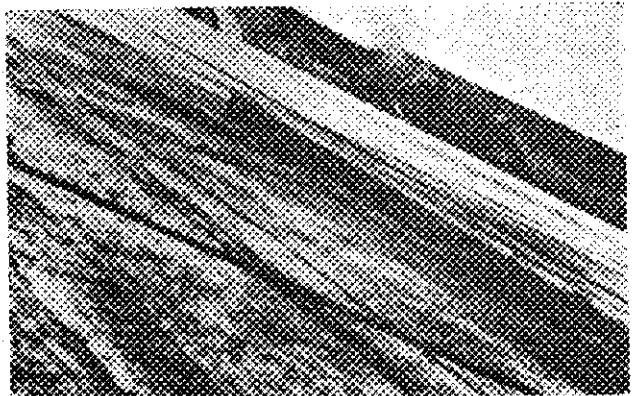


Fig. 2 Grand Coulee ダム越流部のハニツ(ふくらみ)のあるコンクリート表面とキャビテーション侵蝕(228)

キャビテーションによつて被害をうけていた(Fig. 2)。この例でも設計者達は越流路部分は図面に示された線、勾配および寸法にすべての点で合うように仕舞っていた。実際にはいくらかのずれは期待されるべきだが、損傷の生ずるキャビテーションを防止するようなずれの許容範囲は正確には決められないので、そのためGrand Couleeの経験にたつて極端に厳格な仕様書が現在とられている。キャビテーションが原因である広範囲の損傷は、最初の侵蝕はキャビテーションによつて生じ、下流のより大きい侵蝕面積はジェット作用の結果だと説明されるのが普通である。実際的には全損傷の機構解析は二次的な問題で、損傷の部分は修理され、キャビテーションの原因はもし可能なら認められ、取りのぞかれる。しかしながらキャビテーションは粗になつた表面に生じ、最初のキャビテーション・ポケットによつて影響された部分よりはるか下流まで破壊し続ける。噴流(ジェット)作用は

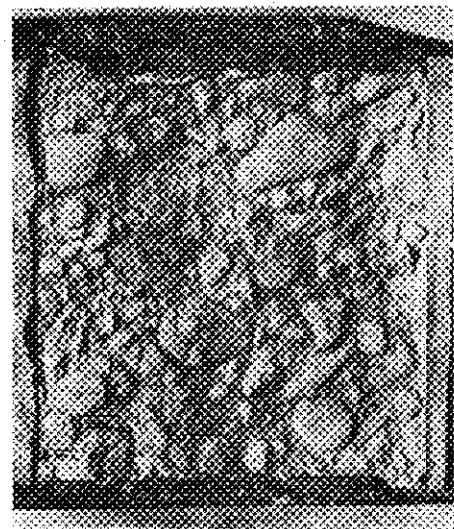


Fig. 3 Davis ダムの侵蝕表面の1ft²プラスチック模型 (Specimen No. 2)²¹⁾

ゆるんだ部分微片を洗い去ることにより、損傷を大きくする。これはジェット作用が損傷をあたえる力として微力だという意味ではない。ただジェットとキャビテーションのこの関連破壊性はある場合に偶然示された。すなわち、新鮮なモルタルがコンクリート表面にはお飛ばされてそのまま硬化した。後にその表面が高速流にさらされた。単に表面にくっついていてだけで、そのモルタルのかたまりはジェットの全力に対しても残るが、そのかたまりによつて起されたキャビテーションは、下流のコンクリートを侵蝕し去るだろう。

コロラド河の Davis ダムの建設中、河水は越流路バケットの部分に仮に流された。色々な種類の層がまきある面積が洗刷されてしまうまで洗らい廻され、いくつかの場所では仕上り表面以下 3 in からそれ以上の深さまで洗刷された (Fig. 3)。バケットが除水され、洗刷部分が調べられたとき、これらの粗面化された表面はキャビテーションを誘導するかどうかという問題が起つた。プラスチック型が損傷をうけた数カ所の違つた部分についてとられ、これらの型からコンクリート模型がつくられ、色々な表面のキャビテーション・ポテンシャルが米国開拓局水理試験所で測定された。もつとも越流路放流はいそがれ、試験研究に十分な時間がなかつたので、すべての洗刷面積は原形高さへの修復工事が認められ、施工された。粗表面の許されうる程度に関する問題は解決されずに残つた。後に Davis ダムからの粗くされた表面の模型が手許にあつたので、同局では色々な相面のキャビテーション・ポテンシャルに関する評価の方法を考案する探求的実験を始めた。実験はキャビテーション試験装置 (Fig. 1) の上流部水圧管取付形状変更以前のもので行なわれたから、6 in x 3 in の試験表面の上に高速流を通し、上部の透明材料を通してキャビテーション雲の発生をみるまで流速 (35 fps まで可能) と圧力水頭 (大気圧以下 17 ft までさげうる) を加えた。模試粗面としては No 2

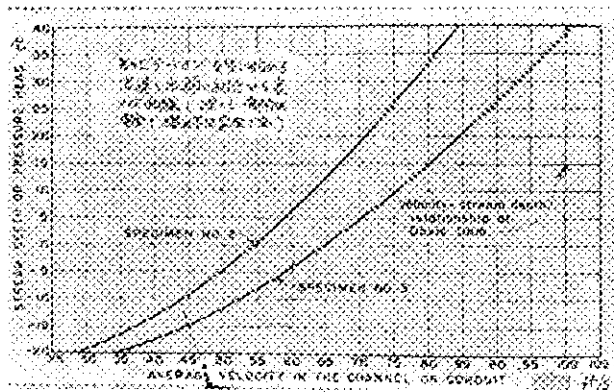


Fig. 5 (a). 流水深 (または水頭) と平均流速の関係 (cfs)⁽²⁾

(平均露出骨材高さは粗面の最低部より約 3/4 in) と No. 3 (約 1/4 in) に限り、流量はヴェンチュリーメータで、平面的に色々な点の水頭は、ピエゾメータとマノメータとで、また粗面上 3 in までの深さの流速はシングル・レーク・ピトー管で測定された。断折は垂直方向の流速分布を表わす半対数グラフをかき、粗面に対するカルマン・ブランドル公式からえた摩擦速度とキャビテーションを生じ始めるときの水頭の関連を表わす曲線をかき、ついでキャビテーションが生じ始める状態に対する流速 (あるいは水頭) に対する粗面近くの平均流速がプロットされた (Fig. 5 (b))。この図表に対する値は容易に計算されるので、設計者には色々な粗面に対するこの種図表があれば貴重なものであろう。Davis ダムの場合には右側の三角印のように充分キャビテーションの起る範囲にあつた。

次に越流部と限らず放水工などでも高速流が流れるコンクリート水路の底面または壁で、施工上の不備から僅かの段違い (オフセット) や虫くい状孔 (バグ・ホール) があつても、その下流にキャビテーション侵蝕が生じる。精密な検査で、Palisades グム放水路ゲート下流部の急

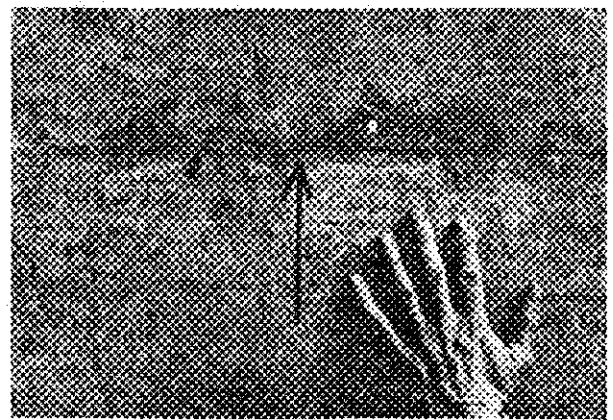


Fig. 4 コンクリート壁の急な段違い (流水中へ) の下流キャビテーション侵蝕⁽¹⁾

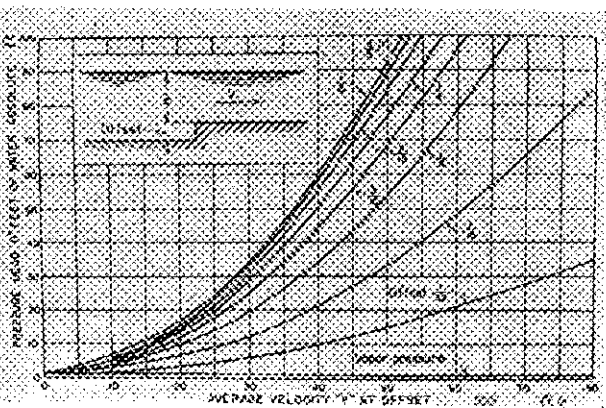


Fig. 5 (b). 急な流水中段違いにおけるキャビテーション初期発生に対する水頭、流速関係⁽¹⁾

な流水内への約 1/8 in のオフセットのすぐ下流でキャピテーション被害を認められた (Fig. 4)。これは最近開拓局水理試験所で行なわれた急激なオフセットのキャピテーション・ポテンシャルをきめるために行なわれた試験結果とよく合う (Fig. 5 (b))。

キャピテーション損傷はバンプ・ホールとして知られている。施工さずからすぐ下流のコンクリート表面にも認められた。

越流路、放水工の静水池における空洞現象侵蝕⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾
越流路や放水工の設計で最も大事なことは、下流趾部河床侵蝕の防止である。莫大なエネルギーは流水が河床に達するまでに減殺されねばならず、跳水・拡散および放射の方法がとられるが、跳水は下流水位の変動に敏感で不経済な水平エプロンに代つて、高速流路中に設けられたシュート・ブロック、阻柱、端末歯型の全部または一部をもつ跳水静水池は下流水位に関らず跳水を局限し、エネルギーを減殺するので開拓時でも工兵隊でも普通に使われている。前者では過去の模型実験の結果を整理してフルード係数を指標として静水池を7つの型に分けて標準設計指針をあたえているが、フルード数 (米因単位で) 4.5 以上で高い越流路にはシュート・ブロックと歯型をつけ、エプロン長を 33% へらし (II 型)、低い越流路や放水工では更に阻柱を加えて 60% 延長をへらすことを示唆している (III 型)。そこでこれらの障害物の形状が適当でないとキャピテーションが起し、相當な被害をうける機会も多いわけである。

コロラド河の Bonneville ダムは工兵隊によつて造られた多目的ダムで、1934 年着工、1 期工事は 1942 年に竣工した。越流部の全長は 1,450 ft で 18 門の垂直昇

降式ゲートが設けられている。両側 3 門は 50×60 ft (高さ) で残り 12 門は 50×50 ft である。設計洪水量は、1,600,000 cfs である。天端標高が E.L. 24 ft で上流静水位が E.L. 82.5 ft 普通標高は E.L. 72 ft、これに対し下流側水位は E.L. 8.2 ft、これより約 20 ft 低い水脚部に三列の干鳥配列の阻柱があり、これより下流に一段下つたコンクリート・エプロンが続いている。ダム軸下流の 97 ft の所に施工線手が軸に平行しており、阻柱床面と越流ダム本体が区画されている。さて 1938 年 3 月まで完成されなかつたこの越流部は 1935 年から使用されていた。そして 1939 年に潜水夫によつて静水池コンクリート侵蝕の完全な調査が行なわれた。これで侵蝕は全長にわたり、また阻柱上および阻柱の下流両角に近い平面上に、また阻柱の角に、垂直両側面に認められた (Fig. 6)。侵蝕は阻柱上流端より軸手の方へ 8 ft のびて居り、線手ではとまつていた。

1954 年 7 月から 10 月の間に工兵隊の水理試験所で行なわれた阻柱に関するキャピテーションの実験は有益である。Fig. 1 に似た 15~30 fps で色々の圧力をつくれる低圧水槽で、木製の約 1:32 の垂直上流面をもつ A~G 型と 1:24 の傾斜上流面をもつ H~J 型の 10 型について実験された。初期キャピテーションの発生 (各部に対する) が K で表示された。K の適用は厳密には定性的なものだが、大体これで目安はたえられる。すなわち模型が大きくなると段々もつと大きな K に対してキャピテーションが発生するようになるが、一方現物では越流面上の乱れ境界層の発達に模型の平均流速よりかなり小さい流速を阻柱上の流速として生ずるといふ考である。H 型が Bonneville の原型だが、実験で生じたキャピテーションは全く被害と合ひ、とくに阻柱下流角近くの床面での発生は興味深い。結局最もキャピテ

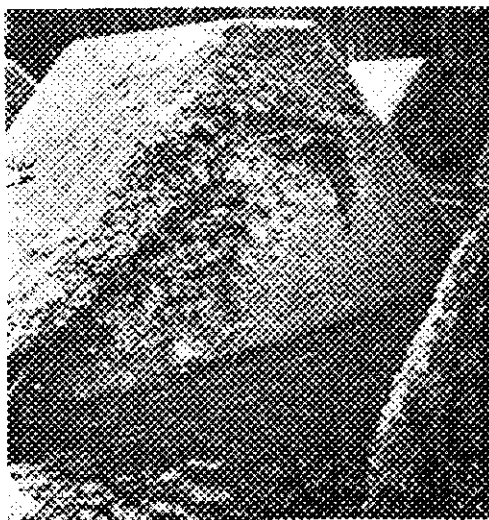


Fig. 6 Bonneville ダム静水池における阻柱表面の典型的侵蝕⁽⁹⁾

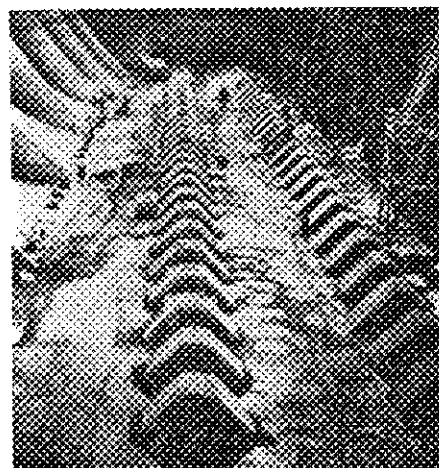


Fig. 7 セルラー締切内で工事中の Bonneville 静水池における侵蝕修理工事⁽⁹⁾

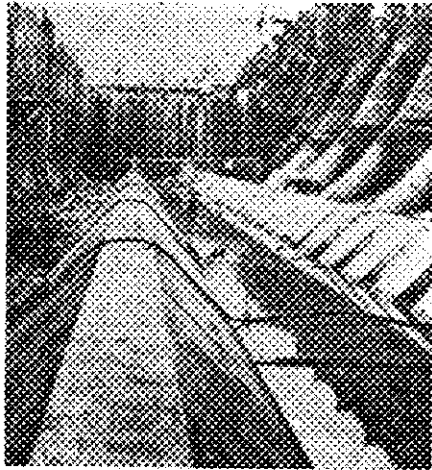


Fig. 8 原型阻柱の下流側を連続阻柱に変えて完成された工事⁽⁹⁾

ンションに強い最良の型としてJがえらばれ、修理工事の状況は (Fig. 7 および Fig. 8) にみられる。J型は6 inの面取りをつけ、上流底部両角は楕円形とし天端下流も流線形となっており、上下流面が1:1の梯形で面取りも2 in だった原型と比較すると興味深い。

オオイス河の Lucky ダムも工兵隊のものだが、その放水工にも著しい被害があつた。簡単にのべるとこの放水工末端は主放水路から60°の角度で5つの放水路がブランチし、各スライド・ゲートで調節の後フリップ・バケットで放水させる構造である。このゲート下流のインバート表面延長25 ft が末広がり浸蝕されて異形鉄筋が露出した。但しゲート直下流のブロック・マットの良質コンクリート12 in 幅は被害なく (最大骨材3/4 in でセメント配合588 #/yd³) 浸蝕されたインバート・コンクリートは、最大骨材3 in、配合376 #/yd³ だった。288 ftの水端で4,800 cfs までのかんがい水をゲート1門で6~8 ft 開いていたときは被害なく、道路への飛沫を考慮して5門のゲートを各1.8 ft 開きどしたところ10 日間でひど

い浸蝕をうけたわけである。結局3.5 ft より大きいゲート開きでは安全だが、極大開きのとき、キャビテーション侵蝕を直下流インバートにあたり、多少の孔が形成されると衝突ジェットによつて誘われる高注入圧と急激にフラクチュエートする表面圧力で加速度的に侵蝕がふえて行なつたものと考えられた。

次にノース・プラッタ河に1958年完成の開拓局 Glendo ダムの放水工の例を承そう。この平面図は Fig. 9 のとおりである。侵蝕がすべてのフレイア壁にみられたが、その線形の著しい発散によつておきたものと思われる (Fig. 10 (b))。これらの部分へは空気の導入がキャビテーション対策となる。角落し戸みぞ下流底部のキャビテー

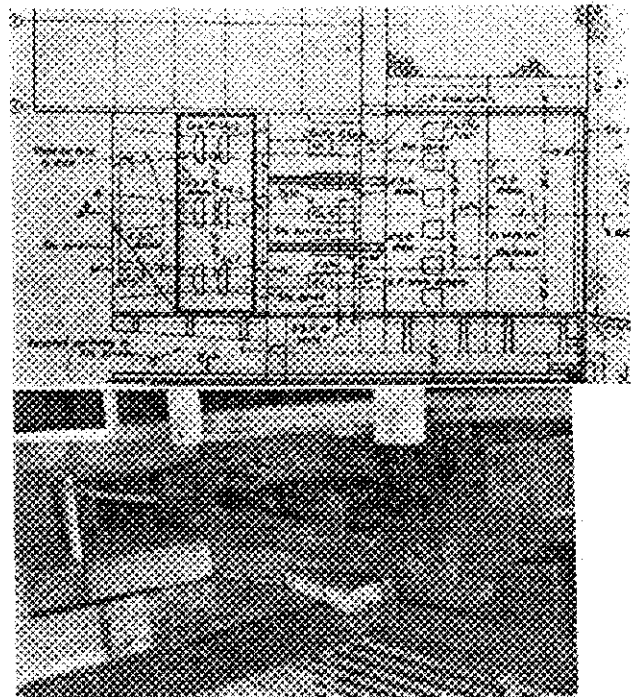


Fig. 9 Glendo ダム放水工静水油平面図⁽⁹⁾と水理実験用模型

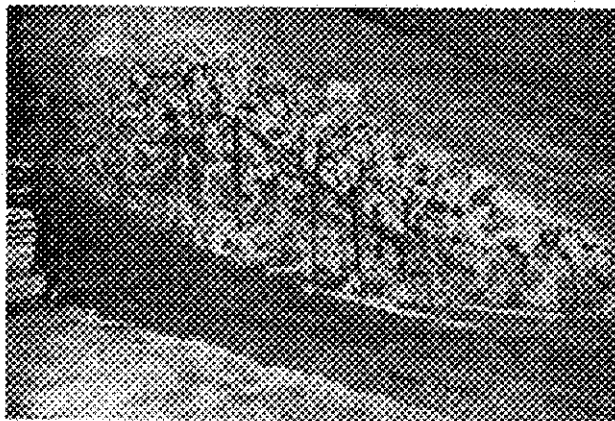


Fig. 10 (a) Glendo 放水工第2ゲート下流シェード・ブロックの右側⁽⁹⁾

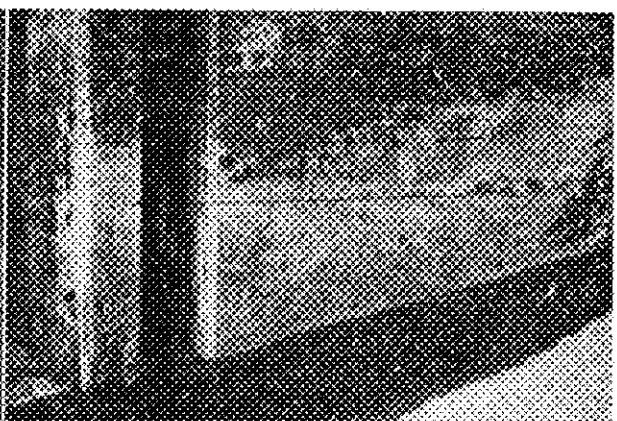


Fig. 10 (b) Glendo 放水工第2ゲート (3門の中央) 右側フレイア壁と角落し戸下流の侵蝕⁽⁹⁾

シオン侵蝕も Fig. 10 (b) に見られるが、戸みせの影響と考えられ、これをうめることが計画された。各ゲート下流放水中央シュート・ブロックに対する驚くべきひどいキャビテーション被害は (Fig. 10 (a)) ブロック形状がこれらの傾斜している上端表面に噴流が衝突したときに生ずる負の圧力を防止できなかったことを示している。明らかに格闘形角は素りにシヤープでブロックの垂直側面の低いキャビテーション圧力をふせげなかつた。最大の侵蝕深さは 20 数 in におよんだ。床ブロックのコンクリート損傷はキャビテーションの特徴ではなく、高速流の衝突によるものと思われる。これらの修理工事は 1959 年早々に発注されたが、シュート・ブロックの形状、阻柱の形状が下流水位と関連されて同年半ばまで水理試験された。実験は 1:18.4 縮尺の 1 本のみのものがつくられた (Fig. 9)。空気導入と戸みせをうめることは上に述べたが、更にシュート・ブロックの両側の不充分的な流線形を改良して原形よりもつと長く、天端と床面との角度が小さく、上端両側の脛内形面取りを大きくした 5 型はキャビテーションを除去する確信をえた。また実物の阻柱には侵蝕はなかつたが、これも計画流線形ができれば侵蝕されるということと、そのための断面改良さらに 8,000 cfs の流量では阻柱の形がかわつただけ、既水の安定をおとし

静水池の満足な機能をうるためには余分の下流水位があることを調べた。一方 Fig. 1 の試験装置で、大気圧以下の圧力下で、原型ブロックの実験が行なわれたが、明らかにキャビテーション雲が上端両角にみられた (Fig. 11)。また流線形 5 型シュート・ブロックの模型ではみられなかつた。この試験には木製のシュート・模型がつくられ、ただ 6 個のピエゾ・メータが模型の必要部分にとりつけられ、マンロープと電磁式インクグラフが圧力測定に用いられた。Fig. 11 は約 1:80 の模型で 70 fps で -12 ft (H_0) のときのものである。貯水池はゲート上 135 ft で下流水位はブロック上 10 ft で試験された。

改良型の方は筆者が W. Wagner と D. Colgate の指導で独りで模型原寸書きから担当したもので、下流端下流に Fig. 12 のようなキャビテーション雲がで始める

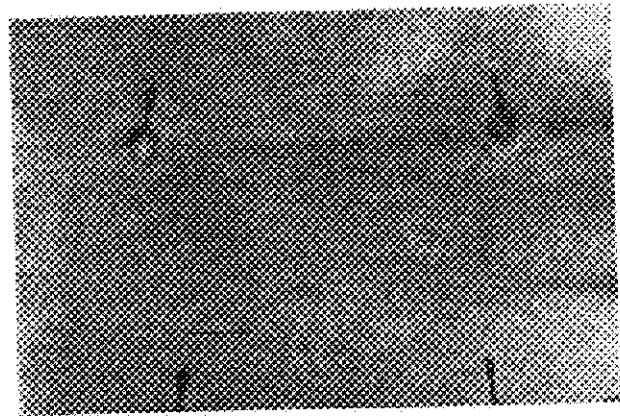


Fig. 11 (Fig. 1) 装置による Glendo シュート・ブロック原型テストのキャビテーション雲⁽¹⁰⁾

(incipient) 時の天端下端における圧力は、流速が約 40 fps, 50 fps, 60 fps と変るにつれ -12 ft (水頭), -3 ft, +8 ft となり、また $K_c = (H_0 - H)/V_0^2/2g$ (米制単位で) は何れの流速でも 0.61~0.63 であつた。勿論上流側面では $K = 0.9 \sim 0.98$ という安全さであつた。

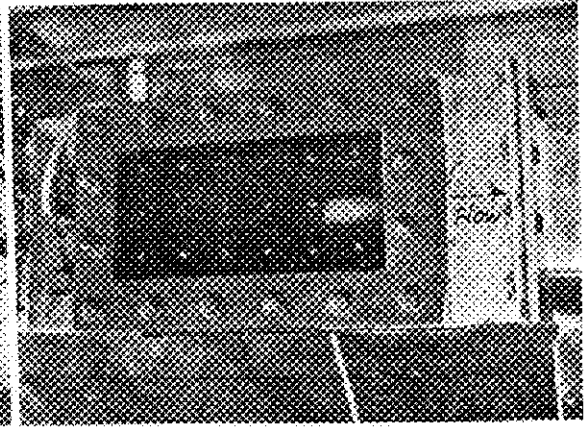
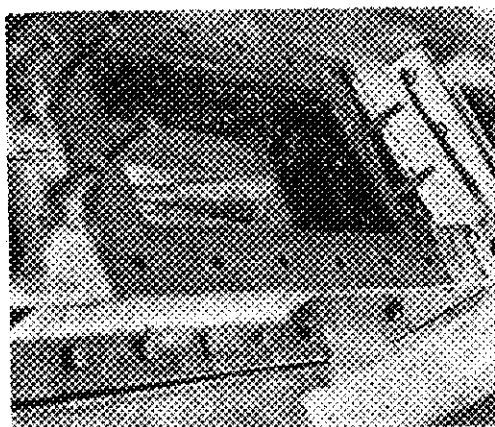


Fig. 12 (Fig. 1) 装置による Glendo シュート・ブロック改良型模型 (左) と現場状況より低圧で発生させたキャビテーション雲 (筆者)

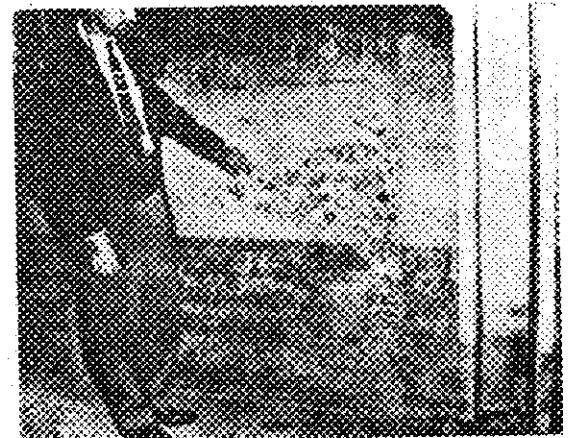


Fig. 13 円味をつけた段差 (オフセット) 下流かごと 12:1 で収束する下流壁をもつた角溶し (ゲート) 戸下下流のキャビテーション侵蝕⁽¹¹⁾

水門扉戸みぞの水理学的特性と直下流の空洞現象侵蝕²⁾

ゲート戸みぞ内の乱流状態とゲート戸みぞからすぐ下流のキャビテーション被害は、ローラー・ゲート(米国では wheel ゲート) やスライド・ゲートが約 35 ft 以上の水頭下で僅少開きで操作されるとき起こる。これらの状態の研究も米国開拓局の実験所で研究され、キャビテーションの生じないゲート戸みぞの設計が考案された。戸みぞの設計が適当でないときは必ず乱流とキャビテーションはその直下流に生じ Fig. 13 のような被害はこの例に限らない。ゲート下端と戸みぞとの関係も戸みぞの形をそのものの改良も乱流調節に役立つ。キャビテーションは戸みぞ内または戸みぞ近くに蒸気圧の発生を防止することによつてのみ除去される。現今設計されるような高水頭のもので、この蒸気圧発生防止を図ることは大変困難なことで、従つてゲート戸みぞ問題は主に圧力の強度と分布の研究となる。米国開拓局 ストリーモ・ゲートはキャビテーション侵蝕によるローラー・チェーンの損傷をうけ、1941 年にその対策の研究を始めた。最近はまだ色々の種類の放水工ができたがますます高水頭で無理な操作が行なわれる傾向にあり、とくにスライド・ゲートの場合はそうであるが、近年の検査で重大な損傷が報告されて再びこの問題はハイライトをあげ、ゲート戸みぞの研究が強調された。

長年の試験研究の資料はそれぞれイェソノータの位置が違つたので比較がむづかしかつた。戸みぞ下流角とすぐ下流区域のはげしい圧力勾配は異なる機型における関係位置を全く重要なものにする。この問題の区域の低圧力は $K = Hx - B_j/Hr$ の関係図表で比較した。また Fig. 1 のような装置でも試験された。結論をいそげば、普通の上下流同一線上の平行壁をもつ戸みぞの下流角からすぐ下流の低圧力はキャビテーションを生じ易い。戸みぞの厚さに対する幅の比が大きくなるに従い、低圧となる。ただしこの設計も約 35 ft 以下の水頭には充分である。戸みぞ上流角のデフレクターは下流圧力をおとし、キャビテーションをおこすオフセット作用を生ずる。下流角にオフセットを有し(故意に浅くする)平行下流壁をもつ形は戸みぞ内に負の圧力を生ずる。これは中位の水頭に対しては充分のようである。下流角オフセットと発散する壁をもつ戸みぞは、戸みぞ内あるいは下流角よりすぐ下流に低圧力を生じ、これはオフセットの大きさによる。この設計は戸みぞ幅の限られた範囲で大きなオフセットまたは小さな水頭でのみ充分である。下流角オフセットと一定率収斂の壁をもつた戸みぞは、収斂と平均の両壁の交線からすぐ下流に低圧をもつ。収斂の率がふえるにつれ、低圧は低下し、交線はキャビテーション・カゲンシ

ナルとなる。交線に円状をもてばかなり高水頭でキャビテーションが起こらないようだ。24:1 の率の収斂で 12 in の円い交線をもつものは中位の水頭には適當だが、もつと大きな半径がのぞましい。オフセットと変化する率の収斂とりつけを用いる戸みぞは、水理学的観点からは最も望ましい。ブークはオフセットの 100~350 倍位の径ならばよく、格円とりつけもよい結果をえた。戸みぞの上流角は閉めても欠口をつけてもいいけない。ともに圧力分布に有害であるから戸みぞの拡張は射流を戸みぞに入れるし、下流角での収斂をひどくする。しかし圧力状態はオフセットと収斂壁をもつ設計では (85/降) 率の広い範囲に対しよい具合である。これはとくに 24:1 収斂と大きな径の曲率収斂の場合そうである。戸みぞの流角の下流角は常に流れからはなされねばならない。下流角のオフセットは小さく、またみぞ幅に開通されるべきである。キャビテーションの起こらない戸みぞは、戸みぞを上流にうつし下流角にオフセットをもつもので、これは改良工事に使われる。1/2 in のオフセットと 60:1 の収斂するとりつけを有する 7.5×9 ft のゲートが 200 ft の水頭下で実際にキャビテーションを免れた。

次にゲート戸みぞ物を逆三角形として、小水頭の時も僅かの開きによるキャビテーション発生をさげ、また糸をひいたようなワイヤ・ドローイングの侵蝕をなくし、かつ形と同じゲートを 2~3 の容積の違う箇所に使えろという研究がオーストラリアの Island Bend 計画にあり、筆者も W. Simmons の許でこの最終設計のゲートの各開きについて、圧力分布と流量の関連を観測した。

弁における空洞現象侵蝕³⁾ 放水工によく用いられる調節弁としてチューブ弁、ニードル弁、ボール・フロッグ弁があるが、ニードルなどの形状によつてはピッチェングが生じ、典型的なキャビテーションがその金属材料につき、これは弁の機型実験にも現れる。またゲート弁やグローブ弁のようなかんがい用の弁も僅少部分開きの場合、弁のすぐ下流の低圧力帯に振動、騒音、損傷を伴つて生ずる。

開拓局水理実験所では 135 ft までの水頭下で、種々のこの型の弁の実験が行なわれ、キャビテーション係数を用いて解析された。開拓局で完成された GV-ゲートはゲート下流で流れを弁本体内部より分離させるような形につくられ、すぐ下流で管は急な拡大をさせているが、高水頭下で絞る必要があるところではもつとも満足すべき結果を与えた。すなわち弁下流の水路形にコーンをつけると、キャビテーション傾向は強くなり、急拡大をすると、キャビテーション傾向はへるわけである。

高圧シリンダー・ゲートの空洞現象に関する研究⁴⁾ 前

後に最近のキャビテーション防止を考へての模倣実験による水理構造物設計のうちで興味あるものは、シリンダー・ゲートである。オーストラリアの Showy Mountain 計画では、深さ 300 ft 径 18 ft の取水塔シャフトの下端が 2 つの貯水池を結ぶ Eucumbene-Turnat 圧力水路トンネルの中間に開口し、ここに設けられる直径 20 ft 4 in 厚さ 12.5 in 高さ 9 ft のシリンダー・ゲートにてシャフトより径 21 ft の圧力トンネル中への流入を調節する。この実験が米國開拓局に依頼され、シリンダーの振動、ゲート各部への圧力測定、キャビテーションをひき起こす傾向のある部分の改良などについて研究が行なわれた。

この場合当初設計でキャビテーションが起り易い部分は 2 か所であつた。ゲート下端とゲート敷金物(シート)表面間を高速流が通れるとき、例えば 5,400 cfs を流すため 1.15 ft ゲートを開いた時、当所設計では大気圧以下 18 ft 水頭の低圧とキャビテーションが生じ、ゲートはひどく振動した。色々形をかえたシートが試験されて、ついにキャビテーションの起らぬ形がえられた。第 2 のカ所は、結合シャフトゲート・上端シール(フレームとの接触部)であつた。操作上の理由とゲートが締められるとき、厳密な水密の必要もないので、上部シールは硬ゴム・シールによる表面接触をさせた。したがつてゲート上部シール・リングとフレーム下部シール・リング間には極少のすき間、ギャップがあり、このせまい水路を 277 ft までの色々な水頭で水がとおり、トンネルへ流れるわけで、2 in 以上の大きな開きではキャビテーションはゲートのスキンプレートとフレームのシール・リング間の流路にフレームの導水端付近で起るかもしれない。2 in 以下の極少開きでは、ゲート・シール・リングとフレーム・シール・リング間の間隙に起る。模倣実験はこの部分を模倣でつくつて行なわれた (Fig. 14)。勿論その前後は簡単化された。電気追跡はキャビテーションをおこすかどうかの低圧を迅速に追跡した。ゲートがあげられたり下げられたりして 4~4-3/4 in の間の開きでおこるゲート・シール・リングの 30° 傾斜面の圧力におこる急激な変化は、ゲートに僅かの移動をあてるかもしれないが、ゲート・ガイドにおける摩擦はこの傾向に勝つたらしい。またひどい振動は起らないという結論がえられた。最後設計では、ゲートが 4-1/2 in 以下の開きのとき、フレームとゲート・シール・リングのギャップは 1/16 in に改良された。1/16 in 流水路の下流における蒸気空洞の形成が Fig. 14 に見られる。ゲート・シール・リングの平行表面 1/4 in は 1/16 in にへらされた。

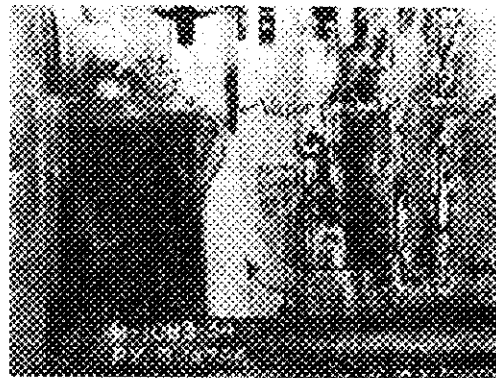


Fig. 14 シリンダー・ゲートのトップ・シール部水理模倣試験 1/16 in 長さの流水路(ゲート・シール・リングの平行表面の間)より下流の蒸気ポケットの

この実験などはキャビテーション・フリーの水理模倣構造物あるいは水理機器を設計しようとする米國開拓局の実験の進め方の良い例なので、ここに概要を紹介し、従来中この種問題について始終 J. W. Ball 課長の指導をうけたことを感謝して結びとする。(本文に引用した参考文献を下記する)

REFERENCES

- 1) Hydraulic Laboratory Practice, Engineering Monograph No. 18, the U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo., 1953.
- 2) U. S. Bureau of Reclamation: Concrete Manual, Sixth Edition, Denver, Colo., 1956 (p. 12)
- 3) Donald Colgate: Cavitation Damage of Roughened Concrete Surfaces, Proc. ASCE, Vol. 85, No. HY 11, Nov., 1959.
- 4) Hydraulic Design of Stilling Basins and Bucket Energy Dissipators, Eng. Mon. No. 25, the U. S. B. R., Denver, Colo., 1958.
- 5) H. V. Klass and F. C. Ingram: Dams on the Lower Columbia, U. S. Dams Study Tour, U. S. Committee on Large Dams, 29 W 39th St., New York 18, 1958.
- 6) Cavitation at Baffle Piers, Miscellaneous paper No. 2-137, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U. S. Army, Vicksburg, Mississippi, June, 1955.
- 7) J. H. Doxone and W. L. Burgess: Inspection of Lucky Peak Dam, Boise River, Idaho, Inspection Report, Office, Chief of Engineers, U. S. Army, Washington D. C., Aug., 1955.
- 8) Modification of Glendo Dam Outletworks Stilling Basin, Specification No. DC-5139, the U. S. B. R., Casper, Wyo., Jan., 1959.
- 9) Interim Report of Hydraulic Model Studies, Glendo Dam Outletworks, Memorandum, Hyd. Lab., the U. S. B. R., Denver, Colo., Feb., 1959.
- 10) Cavitation Model Test for Glendo Chute Block, Hyd. Lab., the U. S. B. R., April, 1959.
- 11) J. W. Ball: Hydraulic Characteristics of Gate Slots, Presented at the June, 1958, ASCE Convention at Portland, Oregon.
- 12) J. W. Ball: Cavitation Characteristics of Gate Valves and Globe Valves Used as Flow Regulators Up to About 125 FT., at the 1956 ASME Fall Meeting in Denver, Colo.
- 13) J. W. Ball: Cavitation and Vibration Studies for a Cylinder Gate Designed for High Head, at the 8th Congress of the IAHR, Montreal, Canada, August, 1959.