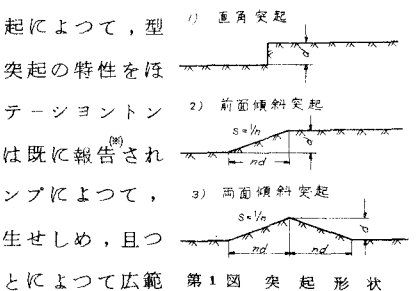


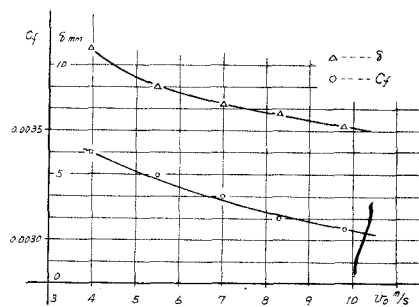
I 緒言 高速流水路壁面のコンクリート施工継目等に見られる微小な突起はその形状および流れの条件によつてキャビテーションの発生原因になる。本研究は近年の高ダムの洪水吐、特に高落差トンネル式洪水吐、発電所の直上に設けられるスキップ・ジャンプ式洪水吐等の水路壁面施工に関連して、コンクリート壁面に予想される各種形状の微小突起のキャビテーション初生条件を実験的に検討したものである。そして高速流水路の各標高において許容し得る突起の程度を示し、これを既設ダムの洪水吐におけるキャビテーション損傷の実体調査結果と比較して、コンクリート水路壁面の施工仕上げの基準を求めたものである。

II 実験方法 水路壁面微小突起の形状としては第1図に示すような3種の形を想定した。直角、前面傾斜および両面傾斜の各突起によつて、型枠の不整、施工継手の段違い等に原因するコンクリート壁面突起の特性をほぼ表現し得るものと考えた。実験装置は閉管路式のキャビテーショントンネルを用いた。電研のキャビテーショントンネルについては既に報告されているので、ここでは詳しい説明を省くが、15馬力の軸流ポンプによつて、巾10cm、高さ15cm、長さ50cmの試験部に最大12m/sの流速を発生せしめ、且つ圧力調整室内の空気圧を調整(+760mmHg~-600mmHg)することによつて広範な流速条件におけるキャビテーション特性を検討することができる。実験方法として、コンクリート水路はキャビテーションによる浸蝕に耐え得ないという観点から、いわゆる発達したキャビテーションは対象とせず、キャビテーションの発生する瞬間の条件、すなわち初生条件のみについて検討を行なつた。第1図に示した突起の種々の高さおよび勾配の真鍮製テストピースを試験部底面に設置し、キャビテーション初生の瞬間を発生気泡の圧潰によつて生ずる超音波を検知することによつて求めた。流速ないしは圧力条件を変化せしめることによつて生ずるキャビテーション初生をブラウン管上に示される超音波信号によつて観測し、その条件における試験部の流速および圧力分布を測定して初生時の諸特性を定めたものである。

III 試験部の流れの特性 John & Bell 縮流管(面積縮尺比, 1/24)に接続された試験部の流速分布は壁面に沿う僅かな範囲の境界層部分(厚さ10mm以内)を除いてはほとんど一定で、流れは主流部と乱流境界層部分に分割される。縮流管および試験部は真鍮製であり、かつ精密に仕上げられているので、流れは滑面の抵抗法則に従い、境界層内の流速分布は対数分布則で良く表現され、測定値より Clauser の方法によつて求めた抵抗係数 C_f 、境界層厚 δ と主流流速 v_0 の関係は第2図

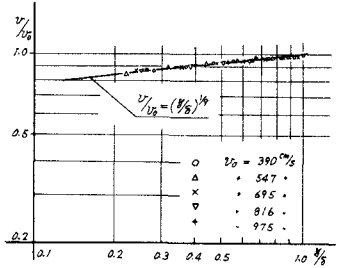


第1図 突起形状

第2図 試験部テストピース設置面の δ , C_f と v_0 の関係

2図のようであつた。また流速分布は $\frac{1}{2}$ 乗則で良く近似され、第3図のように示された。

乱流境界層内には乱れと剪断力の相互作用に原因するある強度の圧力変動が存在する。この圧力変動がキャビテーション初生時の圧力条件に影響しないか、また管路系に個有の圧力変動が存在しないかということの検討のために試験部壁面の圧力変動を歪計式圧力変換器によつて測定した。試験部壁面の圧力変動は乱流境界層内



第3図 テストピース設置点の流速分布

の圧力変動理論によつて良く表現され、圧力変動をGauss分布と仮定すると予想される変動の最大振幅は流速に無関係に流速水頭の約4%であり、キャビテーション初生条件に特に影響を与えるものとは考えられなかつた。

Ⅳ 微少突起のキャビテーション初生係数 キャビテーションの発生状態を表現する無次元量として、(2)式で示されるキャビテーション係数 K が一般に用いられる。

$$K = \frac{P_0 - P_v}{\rho v_0^2 / 2} \dots \dots \dots (1)$$

但し、 P_0, v_0 :基準点の圧力と流速、 P_v :蒸気圧

初生時の K は初生係数 K_i として示され、ある特定の物体につき流れの条件から定められる K が $K > K_i$ であればキャビテーションは発生せず、 $K \leq K_i$ ならばキャビテーションは発生し、 $K_i - K$ はキャビテーション発達 の程度を示す。一方、物体表面の圧力条件を表現する無次元量として圧力係数 C_p が一般に用いられ、最少圧力 P_{min} に対応する最少圧力係数 $C_{p min}$ は(2)式で定義される。

$$C_{p min} = \frac{P_{min} - P_0}{\rho v_0^2 / 2} \dots \dots \dots (2)$$

キャビテーションの初生条件は $P_{min} \neq P_v$ と考えて良いから、(1)、(2)式より

$$K_i \neq (-) C_{p min} \dots \dots \dots (3)$$

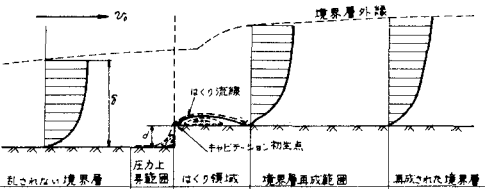
しかし、現実には種々の複雑な要素の影響によつて(3)式は一般には成立しない。第一に初生時に境界層がはく離するか否かによつて決まる移動型および固定型というキャビテーション形態の基本的な相異があり、第二に物体の置かれる流れの特性、第三に流体の性質、特にキャビテーションの核としての不溶解気体粒子の含有度、等が初生係数 K_i に大きな影響を与える。第4図に示すように、高さ d の突起が厚さ δ の境界層中に存在する場合、 K_i は一般に(4)式で示されるものとされる。

$$K_i = f(\alpha, Re, d/\delta, H) \dots \dots \dots (4)$$

但し、 α :不溶解気体粒子の含有度、 $Re = \frac{v_0 d}{\nu}$

H :流速分布の形状係数

一般に、 K_i は Re の増大につれて大きくなる。しかし本実験の場合、ある特定の d について K_i は Re に無関係な一定値を示した。すなわち、第5図に示すように K_i は v_0 に無関係にほぼ一定値となり、 Re による K_i の変化に対しては d の影響が支配的なことが解る。



第4図 境界層中に存在する突起周辺の流れ

核を充分に含む固定型のキャビテーションにおいて α の影響を無視し得るものとすれば、 K_i に対する影響要素は d/δ と H になる。実験条件においては、 $H = \delta/\theta = 11/9 = 1$ 定、であるから、 K_i と d/δ の関係を求めるへ第6図のようになる。図のように、 K_i は当然のことながら d/δ の低下につれて減少する。しかし、この減少度の解析的な検討はなく離領域の圧力分布の解明という難しい問題を含んでいる。

今、突起周辺の圧力状態について、突起に直接に衝突する流れの平均流速 v_d が支配的であると仮定すると、 v_d によつて示した圧力係数 C_{pd} は d/δ に無関係に一定と考えて良い。すなわち

$$C_{pd} = \frac{P - P_0}{\rho v_d^2 / 2} = C_{pd} = 1 \text{ 定} \dots \dots \dots (5)$$

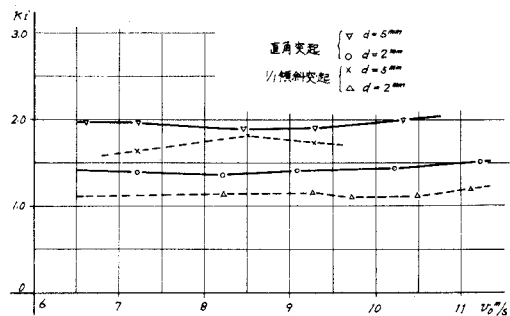
$$v_d = \frac{1}{d} \int_0^d v dy = \frac{9}{10} v_0 \left(\frac{d}{\delta} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

(5)式の関係はその1例を第7図に示すように物体表面上の圧力値については良く成立し、圧力分布は幾何学的に相似なことが解る。従つて、ある突起高 d について、 v_0 を用いて表わした C_p は、(6)式の関係を用いて

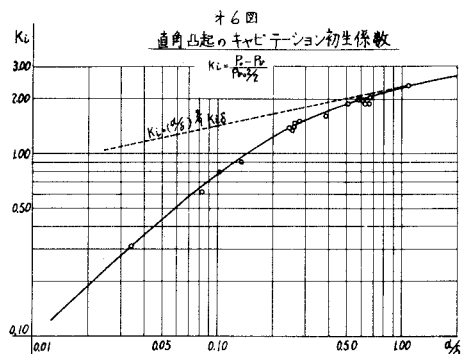
$$C_p = 0.81 \left(\frac{d}{\delta} \right)^{3/2} C_{pd} \dots \dots \dots (7)$$

$K_i \equiv (-)C_{p \min}$ の関係が成立するものとすれば、 K_i は第6図に示した点綫のように d/δ の低下につれて減少するはずであるが、実験値の減少度はこれに較べてはるかに大きい。固定型キャビテーションの最少圧力値ははく離領域の渦の

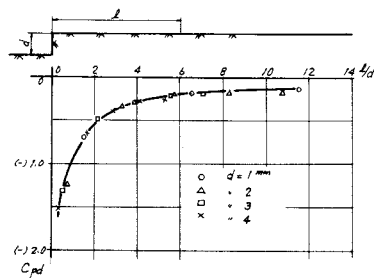
中心に生じ、一般に $K_i > (-)C_{p \min}$ であるが、初生点を強制渦の中心と考えた簡単な解析でも減少度の相異の説明はできない。一方、 K_i を d/δ だけの関数と考えることは実際問題への適用の上でも疑問がある。ダム洪水吐などの実際の水路に考えられる d/δ は一般に実験範囲以下であり、過少な K_i を与える。そして第6図の結果をそのまま適用すれば $d = 5 \text{ mm}$ 程度の突起でもキャビテーション発生の原因にならず後述する実態調査結果と相異なる。物体の大きさによる K_i の変化は境界層流のみならず、平行流中におかれた物体のキャビテーションにも認められている。 K_i の R_0 による変化においても前述のように d の値が支配的であつたこともあわせて、 K_i の d/δ による変化は衝突する流速自体の変化に加えて突起の絶対高による影響が含まれるものと考えられる。また、本実験に用いた d の値は実際の水路に想定される値である。従つて、実際問題への適用のために、流速分布を考慮した絶対高に個有のキャビテーション初生係数 K_{id} を(8)式のように定義した。



第5図 K_i と v_0 の関係



第6図 直角突起のキャビテーション初生係数



第7図 直角突起面上の圧力係数

$$K_{id} = \frac{P_0 - P_v}{\rho v^2 / 2} \dots \dots \dots (8)$$

K_{id} と d の関係は第8図のようである。直角突起の前面もしくは前後面を傾斜させると K_{id} は著るしく低下する。傾斜面突起の初生係数を K_{is} とすると、 K_{is}/K_{id} と勾配 s の関係は第9図のようになる。

V 高速水路への適用 実際問題への適用例として、正面越流型のダム洪水吐を考える。

従来の実測例から、コンクリート面の粗度 $k=0.18 \text{ mm}$ 、乱流境界層の発達には Bauer 公式、流速分布は粗面の対数分布則とする。すなわち

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.024}{(x/k)^{0.13}} \dots \dots (9) \quad \frac{v}{v_*} = 8.48 + 5.75 \log \frac{y}{k} \dots \dots (10)$$

洪水流量 $q=50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ について、ダム下流面各標高

の流速分布、圧力条件を求め、ある想定される直角突起高 d に関して流れの条件から定まるキャビテーション係数 K_d を(8)式によつて求める。この K_d が第8図の K_{id} と比較して、 $K_d > K_{id}$ ならばキャビテーションは発生せず、 $K_d \leq K_{id}$ ならば発生する。第10図は上記の関係を示すもので、 $K_d = K_{id}$ の曲線は実験値に基づくキャビテーションの発生限界を示す。図のように、 $d = 5 \text{ mm}$ の突起は落差約 23 m まで、また $d = 1 \text{ mm}$ の突起は落差約 100 m まで許容できる。仮りに、 $d = 5 \text{ mm}$ の突起が落差 100 m の点に存在している場合、 $K_d/K_{id} = 0.38$ より、第9図に従つて突起を $s = 1/4$ 以下の傾斜面に研磨すれば良いことが解

る。このように、第8、9図を組合せ、流れの条件を考慮して、コンクリート打設後に壁面に存在する微小突起の施工仕上げの基準を定めることができる。以上の結果を既設ダムにおける損傷実体と比較するため、比較的大きな洪水を受けているダムを二、三選り調査を行なつた。微小突起に原因するキャビテーション浸蝕はかなりの程度認められたが、その1例は写真のようである。実験値による突起高とキャビテーション浸蝕有無の関係を第10図に併記したが、実験値と実測値は良い対応を示している。

参 考 文 献

- (*) 千秋, 安芸「電研のキャビテーション試験装置」
技術研究所報告 土木 58012 1959, 3

