高速流中の不陸により発生する負圧の実験的研究

1. はじめに

ダム洪水吐きや排砂バイパストンネル、発電用 水車など、水が高速で流下する領域においては、 古くから損傷を受ける事例が数多く報告されてい る。これらの損傷の原因は、高速流が流下する縦 断方向断面における曲がりや不陸(縦断方向に生 じる段違い)などにより、局所的に大気圧以下の 負圧の作用を受けるため、もしくはキャビテー ション(圧力低下により水分子が液体から気体へ と相転移すること)が発生し、気泡の崩壊に伴い 壊食を受けるためである¹⁾。不陸の発生要因とし ては、施工時の目地や、摩耗損傷等があげられる。

他方、ダム洪水吐きや排砂バイパストンネルの ような土砂混じりの水が高速で流下する施設の場 合には、砂や礫の摩耗作用により部材が損傷を受 ける²⁾。砂礫による損傷対策として、ライニング 工法があげられるが、ライニング材が剥離し期待 された効果を発揮できない場合がある³⁾。その要 因として、ライニング材端部の不陸による負圧の発 生が要因となっている可能性が考えられる。

しかしながら、高速流中の不陸による影響の評 価としては、キャビテーションが発生しない圧力 石田卓也・中西 哲・宮脇千晴・石神孝之

の評価は行われているが、定量的な圧力の計測は +分に行われていなかった。そのため、高速流中 の不陸により発生する負圧を定量的に評価し、ラ イニング材の剥離対策に関する知見を得るための 基礎的な実験を行った。

2. 実験方法

ダム洪水吐き等では、流速15m/sを超える高速 流が発生する。また、キャビテーションは前述の とおり水分子の相転移に起因するため、水理模型 実験で用いられる相似則を適用することができな い。そのため、実験は現地スケールを再現できる よう実施した。

実験は、図・1に示す水路において行った。水路 は、厚さ20mmのアクリル板を用いて製作し、木 製架台に固定し給水設備と接続した。アクリル部 の中間に図・2に示すような段上がりの不陸部分を 設置し、不陸の高さは10、5、3、2、1mmの5段 階に設定した。水路断面は、図・3に示すように不 陸部より上流においては、幅・高さともに0.2m の正方形であり、下流では不陸高さの分だけ高さ を減じている。水路への通水に当たっては、流速 の変化による影響を把握することを目的として、



Experimental Study of Negative Pressure Generated by Unevenness in High-Speed Flow

満管の状態下で、給水する水量を制御することに より不陸上流部の流速を変化させた。流量は 0.100m³/sから0.755m³/sの範囲で与え、不陸上流 部における流速を2.5m/sから18.8m/sの範囲で変 化させた。流下させた状態において、上面ならび に側面から目視、写真、ビデオカメラでの撮影に よる流況観察を行うとともに、図・4に示す位置に ピエゾ管を配置し、圧力計測を行った。圧力計測 の際には大気圧を基準とし、サンプリング間隔を 1msとして32.8秒間の計測を行った。なお、ピエ ゾ管の間隔が小さい区間では、千鳥配置とした。

3. 実験結果

3.1 流況観察結果

流況の一例として、不陸高さ10mmの場合にお ける流速5.0、12.5、18.8m/sの側面観察結果、な らびに流速18.8m/sの平面観察結果を図-5に示す。 流速が10.0m/sより大きくなると、不陸部下流に おいて気泡が観察されるようになり、さらに流速 が大きくなるにつれて気泡の発生範囲が拡大し、 安定的に気泡が発生することが確認された。表-1 に不陸高さと流速を変化させた場合の気泡発生状 況を示す。今回の実験では流速を高めることによ り、すべての不陸高さで気泡の発生を確認した。

この気泡について考察を行うと、流下断面の減 少による断面平均流速の上昇と、不陸による局所 的な高流速の発生により、流体中の圧力が低下し たことによる脱気およびキャビテーション現象で あると考えられる。また、平面観察状況(図-5(d))から、発生した気泡は、不陸より50mm程 度下流でその大部分が消滅していることが確認さ れた。

		不陸高さ(mm)				
		10	5	3	2	1
流速(m/s)	18.8	0	0	0	0	0
	17.5	\bigcirc	0	0	0	0
	15.0	0	0	0	0	—
	12.5	\bigcirc	0	0		—
	10.0	0				
	7.5以下					

表-1 気泡発生状況

(気泡が発生する:○、気泡が発生しない:-)

気泡の発生が顕著になると、不陸部付近から小 さな発泡音が聞こえてくる。これは、発生した気 泡が消滅した際に衝撃圧が発生するためだと考え られる。ダム・堰施設技術基準(案)4より、図-



(b)流速 12.5m/s 側面観察状況





(d) 流速 18.8m/s 平面観察状況図-5 流況観察結果



6 に示す突起高さとキャビテーション発生限界が 提示されており、本実験の結果と比較すると、概 ね同じ結果が得られている。

3.2 圧力計測結果

不陸高さ3、10mmの水路に対し、計測位置を 不陸部から5、40mmとし、流速が10.0、18.8 m/sの場合の圧力計測結果を図・7に示す。

図-7(a)、(c)から、不陸部直下においては、い ずれの流速においても負圧が計測されており、不 陸高さが高い、もしくは流速が大きいほど圧力が 低くなっていることが確認できる。

次に、不陸部からの距離が40mmの地点におい て比較を行う。不陸高さ3mmの場合(図-7(b)) では、いずれの流速においても正圧であるが、不 陸高さ10mmの場合(図-7(d))、流速18.8m/sの 条件において基本的に負圧のままであり、応力の 変動幅が他の波形に比べて大きいことがわかる。 なお、不陸高さ1mmでは負圧は計測されな かったものの、不陸部では気泡の発生が確認され ており、不陸直下のピエゾ管までの区間(5mm)で 負圧から正圧に変化したと考えられる。

圧力の時刻歴波形を比較することにより、不陸 高さおよび流速に応じて、負圧の範囲や大きさの 傾向が異なることが確認された。これらを把握す るために、図・8に示す通り各計測位置における圧 力の時間平均値の比較を行った。なお、平均値の 算出に当たっては、計測された32.8秒間のデータ を使用した。図・8より、不陸部直下では、流速が 大きくなるにつれて平均作用圧力が低下している ことが確認できる。不陸高さ10mmの場合におけ る圧力の最小値は・8mH2O(mH2Oは水柱メート ルであり圧力の単位)で頭打ちとなり、流速を大 きくすることで負圧の範囲が拡大していることが 確認された。今回の実験においては、大気圧を基



-28 -

準としているため、-10.2mH2Oが絶対真空であ ることに起因していると推察される。

3.3 負圧の発生区間

以上の結果より、不陸高さおよび流速を変化さ せることにより、負圧が発生する区間が変化する ことが示された。図-9に示すように負圧区間長を 定義し、図-10に不陸高さ毎に流速を変化させた 場合の負圧区間長を示す。なお、不陸高さ1mm のケースにおいては、平均作用圧力が負とならな かったため、図中には示していない。不陸高さお よび流速に応じて負圧区間長が変化していること が明らかとなった。その変化は、不陸高さが 10mmの場合が最も顕著である。

4. まとめ

本実験では、不陸の直下に多くのピエゾ管を配 置し、負圧の発生状況について詳細に検討した。 本実験において設定したすべての不陸高さにおい て、流速を高めることにより気泡の発生が確認さ れ、流速を高くするほど気泡の発生範囲が拡大す ることが確認された。

圧力計測の結果から、不陸部下流において大気 圧以下の負圧になることが確認された。不陸部直 下流においては、流速を高くすると負圧の絶対値 は頭打ちとなり、以後は負圧の範囲が拡大する傾 向がみられた。その範囲は、不陸高さ10mm、流 速18.8m/sの場合においても、たかだか不陸部か ら50mm程度下流であることが確認された。

以上の結果から、高速流中の不陸により発生す る負圧を抑制するためには、不陸の高さを流速に 応じて抑えることが重要である。

また、ライニング材の剥離については、設置直 後の負圧区間長は短いものの、キャビテーション



図・10 流速と不陸高さの違いによる負圧区間長

で生じた不陸がさらに下流の負圧発生に繋がる可 能性があるため、不陸や損傷状況のモニタリング も重要と考えられる。

参考文献

- 1) 山崎卓爾:キャビテーション工学、p.123、日刊工 業新聞社、1979
- 2) 柏井条介、井上清敬、箱石憲昭:排砂による直線コ ンクリート水路の摩耗・損傷量の推定、ダム技術、 No.274, pp.36~51, 2009
- 3) 西川亨、山根雄一、大本雄二:旭ダム排砂バイパス におけるトンネル摩耗量とその対応策について、第 4回APGシンポジウム&第9回EADC札幌発表論文 テーマ2、pp.80~85、2016
- 4) ダム・堰施設技術基準委員会:ダム・堰施設技術基 準(案)(基準解説編・マニュアル編)、一般社団法 人 ダム・堰施設技術協会、pp.383~384、1999



土木研究所水工研究グ -プ水理チーム 研究

ISHIDA Takuya

ル

肙



土木研究所水工研究グ -プ水理チーム 主任 研究員 NAKANISHI Satoru

宮脇千晴



土木研究所水工研究グ ループ水理チーム 特任 研究員 MIYAWAKI Chiharu

石神孝之



土木研究所水工研究グ -プ水理チーム 上席 研究員 ISHIGAMI Takayuki