

高速高解像画像計測における遡上波の局所流体運動

Local fluid motion of run-up waves image measuring in high speed and high resolution

北海道大学大学院工学院 ○学生員 大島悠揮(Yuki Oshima)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 渡部靖憲(Yasunori Watanabe)

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震は記憶に新しい。この地震に伴って発生した津波の遡上波による被害は過去最大級のものであり、被害低減の為の研究が急務だが、そもそも遡上水深などの基本的な流体運動について未だに研究されてきていない。確かに、海岸工学では遡上波や崩れ波について数々の研究がなされてきたが、これらは最大遡上高や遡上距離の推定ばかりであった。

遡上波フロント部では、遡上加速度、圧力勾配と底面摩擦がつり合い、複雑な相互作用を経て、侵食や土砂輸送に大きな影響を与える。即ち、遡上地形に応じたフロント部の加速度並びに底面せん断力が高曲率で変形する水面形を形成し、これに伴う圧力勾配の増加が加速度及び摩擦力を修正する。これは、津波遡上に伴う侵食行きにおける侵食、海浜の前浜侵食や瓦礫、土砂等の輸送過程における局所的力学機構を考える上で重要と考える。東北地方太平洋沖地震の際、津波の遡上波の伝搬が広く報道され、地形に応じた独特の遡上先端付近の水面形の変化が確認されている(図-1参照)。著者ら¹⁾は、遡上斜面に依存した伝播加速度にตอบสนองする遡上先端部の形状並びにその背後の水層厚の特徴を明らかにし、遡上波内の圧力及びせん断力への寄与を示唆している。

本研究は遡上波モデルとして可変勾配ダムブレイク水槽において発生させたダムブレイク流れの任意勾配斜面上への遡上過程において、遡上加速度に応じて極めて独特の変形を示す遡上波フロントの発達機構、発達する回転流れ及びせん断力分布について実験的、解析的に明らかにするものである。



図-1 2011年東北地方太平洋沖地震津波の遡上波の伝播

2. 実験方法

延長1.4 m、幅0.3 m、高さ0.28 mの可傾斜ゲート及び斜面をもつ全面透明アクリル製ダムブレイク水槽において自由水面の可視化実験を行った(図-2参照)。ゲート上流側チャンバーに水を水深 $h=0.23$ mで貯留し、一定速度(0.8 m/s)でのゲートの引き上げにより、勾配 θ_s で傾斜した下流側、底面上にダムブレイク波フロントが形成され遡上する。本研究では、Laser-induced fluorescence(LIF)実験、Super-Resolution Particle Image Velocimetry (SRPIV)による流速分布計測実験を行った。

LIFによる水面形計測実験では、チャンバー内の水はローダミン6Gで染色され、ゲート下流部の水槽底面下から照射されるYAGレーザーシート面上(波長532nm)で励起した蛍光分布を高速カメラによって周波数500hzで撮影し、遡上する波面の縦断面形状を計測する。

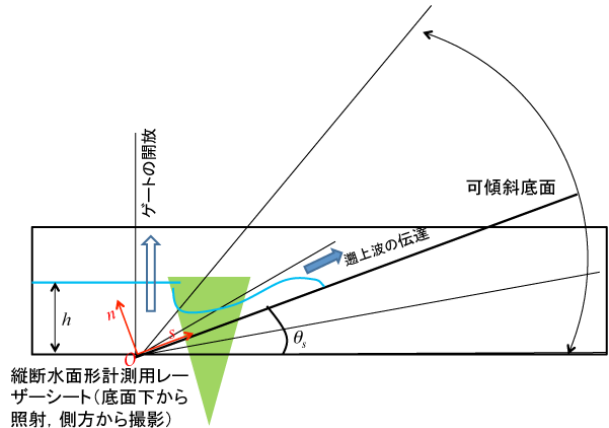


図-2 可傾斜ダムブレイク実験水槽と座標系可視化流速計測実験

カメラレンズに波長560nm以上を透過するハイパスフィルターを設置し、YAGレーザーの水面、側面からの多重反射光を遮断し、ローダミン6Gから放出される蛍光のみを撮影する。水面形計測実験において、ゲート開放時に送信されるTTLトリガー信号と同期して周波数500hz、シャッタースピード1/2000secで高速カメラの撮影が開始され、斜面に沿って100mm毎にトラバースする各ケース5回の試行実験に対して同一位相におけるアンサンブル統計量をベースに議論を行う。両実験で計測される100×100mmのField-of-view(FOV)に対して1024×1024pixelsで撮影された画像は、ファイルとして保存される。画像は、線形投影変換をベースに実座標に変換された解像度0.01mm/pixelの高解像画像解析が行われる。

流速計測実験では、チャンバー内の水に蛍光中立粒子(ダイイオンHP20SSを蛍光着色したもの)を混入し、発生した遡上波内流れによって受動的に移流された蛍光粒子がYAGレーザーシートによって励起され、波長約600nmの赤色蛍光が水槽側方に設置されたカメラによって周波数1000hz、シャッタースピード1/20000secで撮影される。水面系計測実験同様、カメラレンズに波長560nm以上を透過するハイパスフィルターを設置し、粒子から放出される蛍光のみを撮影した。

粒子画像に対して、画像相関法と粒子追跡法のハイブリッド計測法であるSRPIVによってシート面上の流速分布を計測し²⁾、MLSベースの後処理³⁾によって渦度、せん断力を2次精度で算定した。また、流速計測実験において、ゲート開放時に送信されるTTLトリガー信号と同期して高速カメラの撮影が開始され、斜面に沿って50mm毎にトラバースする各ケース10回の試行実験に対して同一位相におけるアンサンブル統計量をベースに議論を行う。両実験で計測される50×50mmのField-of-view(FOV)に対して1024×1024pixelsで撮影された画像は、ファイルとして保存される。画像は、線形投影変換をベースに実座標に変換された解像度0.005mm/pixelの高解像画像解析が行われる。

観察された独特の水面形遷移の力学機構を明らかにするため、気化させたドライアイスを用いた装置において遡上斜面に放出し、その形状の大変形過程を可視化した。

全ての実験は、波面-底面相対角度をパラメータ(表-1参照)とし、統一した初期条件で遡上過程を評価する。

表 - 1 実験条件

case No.	θ_s	Interior angle
case1	0	90
case2	27	63
case3	45	45
case4	63	27

3. 解析手法

3.1. LIF

任意勾配斜面上への遡上過程における水位分布の時間的変化を検証するため、LIF実験により得られた縦断面水面形画像を二値化しn方向(底面と垂直な軸)に積分し水面形状を抽出した。(図-3参照)

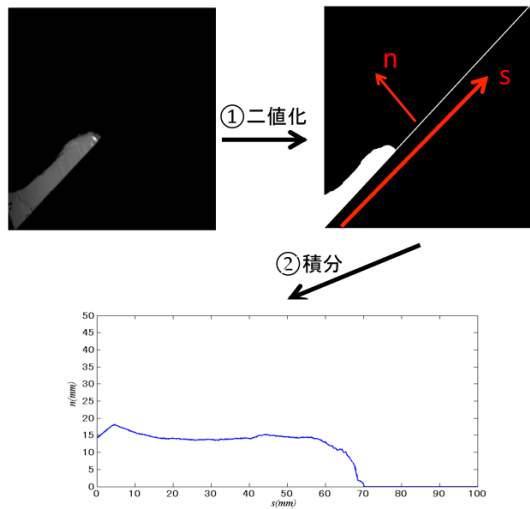


図 - 3 水面形状抽出方法

3.2. SR-PIV

Super-Resolution Particle Image Velocimetry (SRPIV) は、画像相関法 (PIV) と粒子追跡法 (PTV) のハイブリッド計測法である。

- (1) 標準的な相互相関PIVによって検査領域内の平均流速分布を計算(図-4左側参照)。
- (2) マスク相関法により画像上の個々の粒子を抽出する。
- (3) 個々の粒子は(1)の平均流速に近い流速で移流されると仮定し、候補粒子が決定される(図-4右側参照)。

なお推定領域内に複数粒子が存在した場合、通常のPTVの解析手法である3時刻追跡法により粒子の対応付けを行っている。3時刻追跡法は最小加速度の原理(粒子加速度が最小となる組み合わせを正対応とする)をもとに粒子の対応付けを行う手法である。

3.3. MLSベースの後処理

PTVで得られるランダム点上の流速データに対し、本来数値計算の手法であるMLS(Moving Least Square)を適用し、得られた流速の多項式から格子点上の流速分布に変換することなく、直接渦度を求め、数値計算を行う手法である。MLSとはランダムな位置に存在する誤差を含んだ流速や圧力などの物理量やその空間微分係数の最適値を求め、数値計算を行う手法である。我々は本推定法を用いて、渦

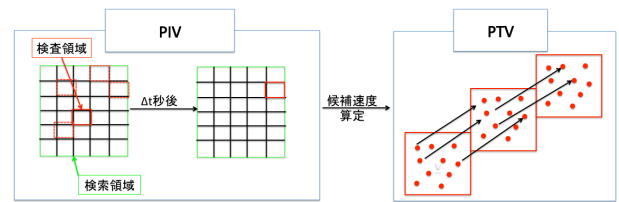


図 - 4 SR-PIVイメージ図

度と同じく速度の微分値であるせん断力を算出した。本研究で使用した流速の多項式は、

$$u(x, y) = a_u^2 + b_u xy + c_u^2 + d_u x + e_u y + f_u \quad (1)$$

$$v(x, y) = a_v^2 + b_v xy + c_v^2 + d_v x + e_v y + f_v \quad (2)$$

である。ここで、 $a_u, b_u, c_u, d_u, e_u, f_u, a_v, b_v, c_v, d_v, e_v, f_v$ は係数であり、領域の速度情報から最小二乗法で求める。そして、(x,y)地点における、せん断力と渦度は

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &= \mu (2a_v x + b_v y + d_v) + (2c_u y + b_u x + c_u) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \\ &= (2a_v x + b_v y + d_v) - (2c_u y + b_u x + c_u) \end{aligned} \quad (4)$$

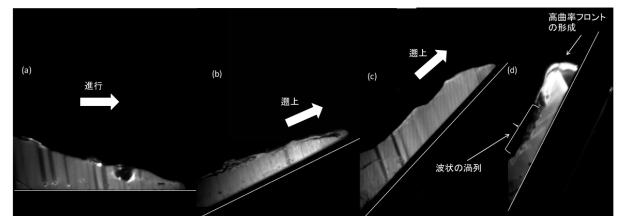
より求めた。(ここで、 $\mu=0.01005$)

4. 結果

4.1. 水面系遷移

LIF可視化実験によって得られた遡上波水面形状は、斜面勾配の急峻化に伴い顕著な変化を示す(図-5)。斜面勾配 0° の場合(a)、先端背後ではほぼ様な水面角度を持つ遡上波面が形成され、進行する。斜面勾配1:1のケース(c)では、先端部背後ではほぼ一定の勾配で水槽厚が増加する遡上フロント部が形成され、その背後では水槽厚が大きく変化しないネック部が出現し、フロントの遡上と共に伸長する。さらに急勾配の遡上では(d)、フロント部はblob状に膨れ上がり高曲率の水面から構成され、薄く伸長するネック部の気液界面近傍に規則的に配列した波状の水面変動が発生する。この水面変動は、Kelvin-Helmholtz不安定で現れる現象と類似しており、これについては後に再度議論する。

ゲート解放後一定時刻ごとの水面形状を抽出し、グラフにまとめたのが(図-6)である。このグラフより斜面勾配の違いによる水面系の時間変化がみてとれる。斜面勾配 0° の時は、水面形状が時間変化にかかわらず一様であるに対して、斜面勾配1:2、1:1、2:1の時は、遡上が進むにつれて水面形状が変化している。

図 - 5 LIFによるダムブレイク遡上波先端近傍の水面形状;(a) 斜面勾配 $\theta_s=0^\circ$, (b) 1:2, (c) 1:1, (d) 2:1

4.2. 遡上波の流体運動機構

本実験においては、斜面勾配の急峻化に伴い初期加速度は増加するため、接触角が大きくなり、近傍の表面張力は増大する。その背後では圧力、底面せん断力と初期加速度

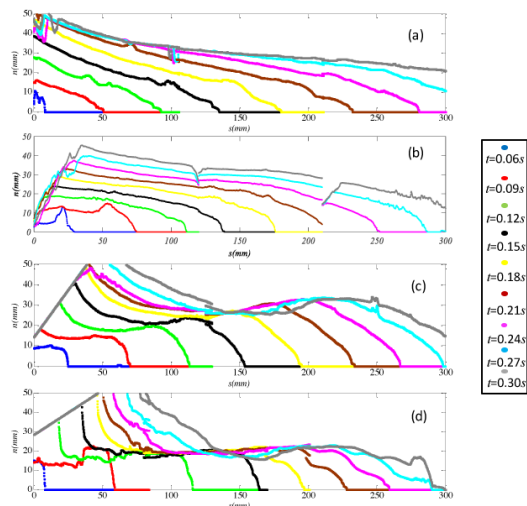


図 - 6 ゲート開放後の縦断水面形の時間変化;上から下へ順に (a)case1, (b)case2, (c)case3, (d)case4

による慣性力がバランスする一方、MC極近傍では高曲率に伴う表面張力によりバランスは崩れ、それを補償する逆向きせん断力が誘発されているものと考える。遡上過程を通じてこの影響は背後域に影響し、結果的に周期的なせん断力の反転が生じている可能性がある。

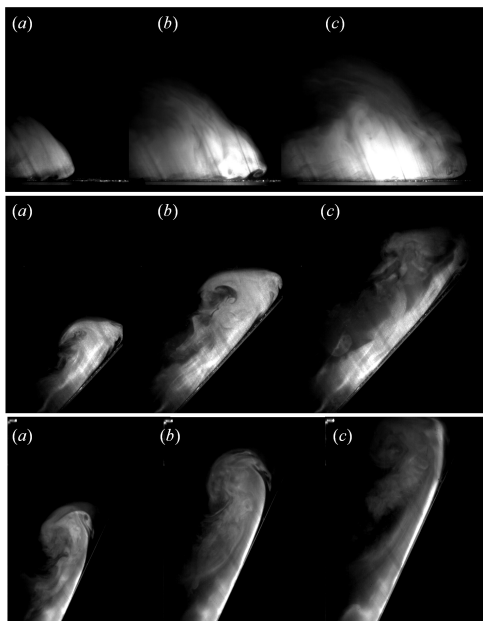


図 - 7 気化させたドライアイスのダムブレイク遡上波のレーザーシート反射光による可視化画像;勾配0 (上), 勾配1:1 (中), 勾配2:1 (下) 時間間隔 0.1 s

図-5で観察できる急勾配上の遡上波ネック部の周期的水面変動パターンはKelvin-Helmholtz(K-H)不安定で生じる現象と類似する一方、加速度の依存性はRayleigh-Taylor(R-T)不安定が発生している可能性を示唆する。こうした流れの変動機構を検討するため、相対的に密度が小さい気化させたドライアイスを使って同様なダムブレイク実験を行った。図-7ドライアイス及び水の遡上波の先端位置と時間との関係、即ち特性曲線を表したものである。ドライアイスは、水のものに比べて遡上速度は小さいが、重力による遡上速度の低下の影響は小さい。

図-7は、勾配0、1:1、2:1に対するドライアイスの遡上の様子を同様なレーザーシートからの反射光を撮影し可視化したものである。水平床上において、位相(a)及び(b)のフ

ロント先端部背後の底面近傍に波状の界面の変動を観察することができる。これは、相対的に重力加速度の影響が低減される低密度の流れが、前節で議論した底面近傍の反転する渦に移流され陽的に可視化されたものと考えられる。

一方、フロント上部の水面が明確に後方に巻き上げられる結果は、有意な回転流れが遡上波特有のblob状水面形状を形成することを示唆する。渡部・大島¹⁾は、ダムブレイク遡上波と底面との間には薄い空気層が混入し、K-H及びR-T不安定の複合機構を経て気泡へと分裂することを指摘している。

本実験によるドライアイスの界面変動は、この結論を支持するものであり、遡上フロント内部の不安定な構造を証明している。勾配の急峻化に伴い、フロント部上方水面の背後への回転性の放出が顕著となり、同時にネック部組織的混合が促進される。これらは、図-5で観察された同様な水面の放出とネック部の猫の目状の水面変動と同一の流体運動機構によるものと考えられ、遡上波フロントの高曲率化及び背後の水面変形が薄い水層内で発達する回転流れに依存するという前節の計測結果を裏付けるものである。

4.3. 遡上波内部流速、せん断力、渦度分布

図-8は、各ケースに対するゲート背後の遡上波内部の流速分布の時間変化を表す。斜面勾配 0° のケースでは、フロント部からその背後にかけて水平流速が支配的である一方、斜面勾配が大きくなるに伴い、底面境界層近傍の有意義な回転運動が生じているのがわかる。斜面勾配1:2のケースでは、遡上に従い、重力の影響による急速な減速のため斜面と並行な流れが相対的に弱まり、局所的な回転流速分布がフロント背後において卓越する。

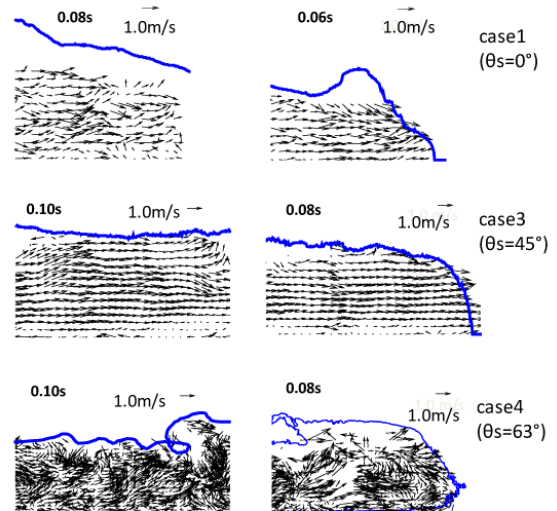


図 - 8 水平底面を伝播するダムブレイク流れの流速分布;上から下へ順に (a)case1, (c)case3, (d)case4

図-9は、各ケースに対するゲート背後の遡上波内部のせん断力分布の時間変化を表す。水槽内の底面側では正のせん断力、その上方では負のせん断力の分布を示す。遡上波先端部背後では、底面に沿ってせん断力の反転が現れる。水平底面上の流れで確認された遡上波先端部背後で反転するせん断力がフロント部背後で斜面の法線方向に発達し、水面近傍においても正負のせん断力が進行方向に対して交互に分布する独特な流れが形成されていることがわかる。

図-10は、各ケースに対するゲート背後の遡上波内部の渦度分布の時間変化を表す。遡上波先端部背後に生じる負の渦度 (反時計回り) は遡上波先端のローリング運動をその背後ではせん断力同様、底面渦度の反転を持ちながら斜

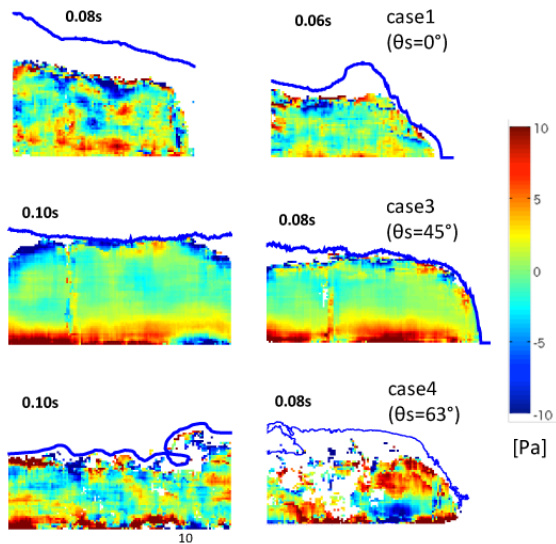


図 - 9 水平底面を伝播するダムブレイク流れのせん断力分布; 上から下へ順に (a)case1, (c)case3, (d)case4

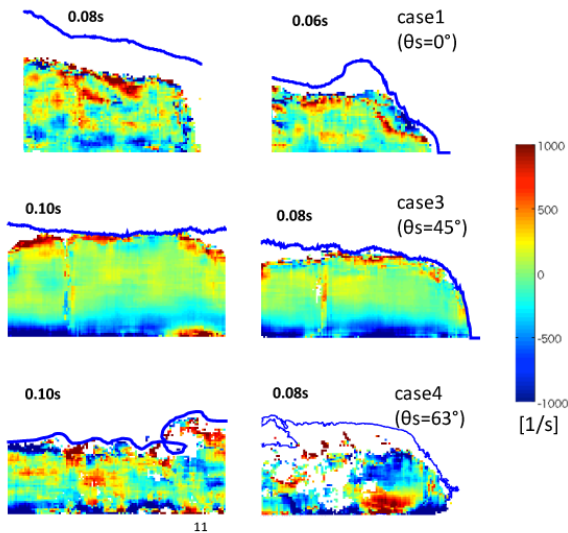


図 - 10 水平底面を伝播するダムブレイク流れの渦度分布; 上から下へ順に (a)case1, (c)case3, (d)case4

面法線方向へ発達する。斜面勾配が大きくなるにつれて渦度の周期的反転が顕著となり、この領域では、ポテンシャル近似はもちろん、通常遡上波の近似で使用される推進方向に一樣な流速分布となる長波近似も適用できないことを表している。このようなフロント背後の回転、せん断流れは、斜面の急勾配化にさらに卓越し、極めて不安定な流れ構造を形成する。この周期的なせん断力、渦度分布は、図-5で確認される水面へ移動が発生する波長と同等であり、遡上流れの記述に対して水面との力学相互作用が重要となるものと考えられる。冒頭述べたように、遡上フロントから発達する底面せん断力の周期的反転及び水槽上層で卓越する回転流れは、底面の侵食、土砂、瓦礫等の物質輸送に極めて大きな力学的役割を持つと考えられる。

5. 結論

斜面勾配に依存した遡上波水面形状、水層内流速及びせん断力の相互作用をLIF可視化実験、SRPIVによる流速計測そして気化させたドライアイス遡上波の可視化実験を通

して調査し、議論した。

LIF可視化実験によって得られた遡上波水面形状は、斜面勾配の急峻化に伴い顕著な変化を示す。遡上波フロント先端の水面は高曲率化し、blob状に膨れ上がり、その背後の水層厚は低下し、また気液界面近傍に規則的に配列した波状の水面変動が形成される。

急斜面の遡上においては、膨れ上がったフロント波頂部が下流側背後へ移流される。SRPIVによる遡上波水層内の流速、渦度、せん断力分布から、フロント部MCから底面せん断力、渦度の周期的反転が生じ、その背後において極めて厚い境界層が発達することが明らかになった。

フロント部では反時計回りの流れがblob状水面形の形成に寄与し、またネック部の水層上方に遡上進行方向に対して交互に反転するせん断力、渦度分布が形成され、波状の水面変動を誘発する。

相対的な重力加速度の影響を低減し（密度差を低下させ）流況に受動的に応答する波面の変動をドライアイスを使った可視化実験によって観察し、水面及び流速計測から議論した遡上波の流体運動機構を裏付けた。

これら一連の結果は、重力に対する相対的な遡上加速度はフロント部の水面勾配を支配し、圧力勾配を決定するだけでなく、背後の渦列生成による混合、輸送にも影響を与えることを表す。

また、こうした有意な回転性せん断が水槽内に組織的に分布する断高加速度の遡上波には、従来使われてきた長波方程式の適用もポテンシャル近似も妥当ではなく、新たな局所流体力の見積りが必要である。

参考文献

- 1) 渡部 靖憲, 大島 悠揮:水面一壁面相対衝突角に依存する遡上波の物理特性,土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp.I.186-I.190, 2014.
- 2) 渡部 靖憲, 堀井 正輝, 新井田 靖郎:遡上波の力学的バランスと流れ構造,土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp.I.66-I.70, 2013.
- 3) 竹原 幸生, 江藤 剛治:MLSを導入したPTVによる渦度推定法の提案と風波流速場への適用、土木学会論文集B, Vol. 65, No. 3, pp.151-165, 2009.
- 4) Sussman, M., P. Smereca and S. Osher: A Level Set Approach for Computing Solutions for Incompressible Two-Phase Flow, J. of Comput. Physics, Vol.144, pp.146-159, 1994.
- 5) Stansby P.K., Chegini A., Barnes T.C.D:The initial stage of dam-break flow, J. Fluid Mech., Vol. 374, pp.407-424, 1998.