

土塊すべりに伴う水面波の数値シミュレーション

日本工営(株) 中央研究所 開発研究部 正員 金 海生¹

1. はじめに 地すべりによる土塊が侵入すると、貯水池、湖、湾などの閉鎖水域の水位が大きく変動する事例は過去に多数観察されている。このうち、特に大規模なものは1963年10月9日イタリアで発生したVaiontダム貯水池の $260 \times 10^6 \text{ m}^3$ に及ぶ岩盤すべり、1958年7月9日アラスカ州の東南、カナダに接したLituya湾での岩盤崩落などの大災害がある¹⁾。日本においても、ダム下流河川での都市化が進行しつつあり、このような災害に対してダム構造物や下流域の都市の安全性を検討することが必要である。本研究では、複雑な平面形状を有する水域での崩落土塊に伴う水面波を精度よく、効率的に予測するために、境界適合直交曲線座標系における平面2次元数値解析モデルを開発し、ある閉鎖水域に適用した。

2. 境界適合直交曲線座標系における平面2次元モデル 地すべりモデルおよびそれに伴う水面波のイメージをFig.1に示した。池谷がまとめた土石流速の観測値は0.6~16m/sであり²⁾、ここでは崩壊土塊の移動速度を20m/sとした。地すべり土塊が水域に突入すると、そのエネルギーが水体に伝わることによって波が発生する。その波は、周期が長く、波長が水深と比べ十分長いものと考えられる。このような水面波は、流入土砂による地形変化の影響を考慮した流れの浅水長波支配方程式を解析する平面2次元浅水流モデルで予測することができる³⁾。一方、流路平面地形が屈折している場合、通常のカラト座標系で解析すると、境界が段階状に近似されるため、局所的な反射が生じ、計算結果に影響を与える。また、水面波の波長は水深が減少するとともに短くなる。沿岸域においては、水深の減少に応じて計算格子を細かくする工夫が必要となる。そこで、本研究では、河岸線などの任意境界および局所メッシュに対して柔軟性がある境界適合直交曲線座標系を用いて、平面2次元浅水流モデルを構築した。流れの支配方程式は下記の水深平均 Reynolds 方程式である。

連続式:
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(u^*hg_{22})}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial(v^*hg_{11})}{\partial \mathbf{h}} \right] = q_1 \tag{1}$$

運動量式:
$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hu^*)}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^2)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial(g_{11}hu^*v^*)}{\partial \mathbf{h}} + h \left(u^*v^* \frac{\partial g_{11}}{\partial \mathbf{h}} - v^{*2} \frac{\partial g_{22}}{\partial \mathbf{x}} \right) \right] \\ & = -\frac{hg}{g_{11}} \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(hg_{22}\mathbf{s}_1^*)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial(hg_{11}\mathbf{t}_{21}^*)}{\partial \mathbf{h}} + h \left(\mathbf{t}_{12}^* \frac{\partial g_{11}}{\partial \mathbf{h}} - \mathbf{s}_2^* \frac{\partial g_{22}}{\partial \mathbf{x}} \right) \right] - \frac{\mathbf{t}_{bx}}{\mathbf{r}} \end{aligned} \tag{2}$$

上記では \mathbf{x} 方向の運動量式だけを示しているが、 \mathbf{h} 方向の運動量式は似た形を有する。ここに、 \mathbf{x} 、 \mathbf{h} は直交曲線座標、 g_{11} 、 g_{22} は座標変換に関するパラメータ、 \mathbf{r} 、 g は水の密度および重力加速度、 $h (= z - Z_b)$ は水深、 z 、 Z_b は水位および河床高である。 q_1 はソース、 u^* 、 v^* は \mathbf{x} 、 \mathbf{h} 方向の流速成分である。 \mathbf{t} 、 \mathbf{s} は乱流応力を含む有効応力で、ここでは経験式を用いて計算する⁴⁾。 \mathbf{t}_b は河床面における抵抗であるが(Fig.2a)、すべり箇所河床面においては、逆に流れの駆動力となる(Fig.2b)。

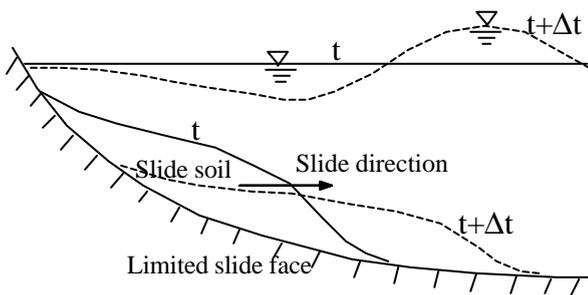


Fig.1 Mode of landslide and water surface wave

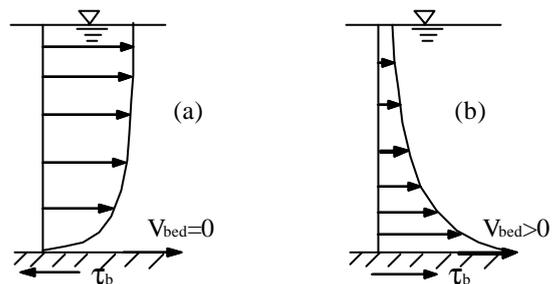


Fig.2 Vertical distribution of velocity and bed shear stress

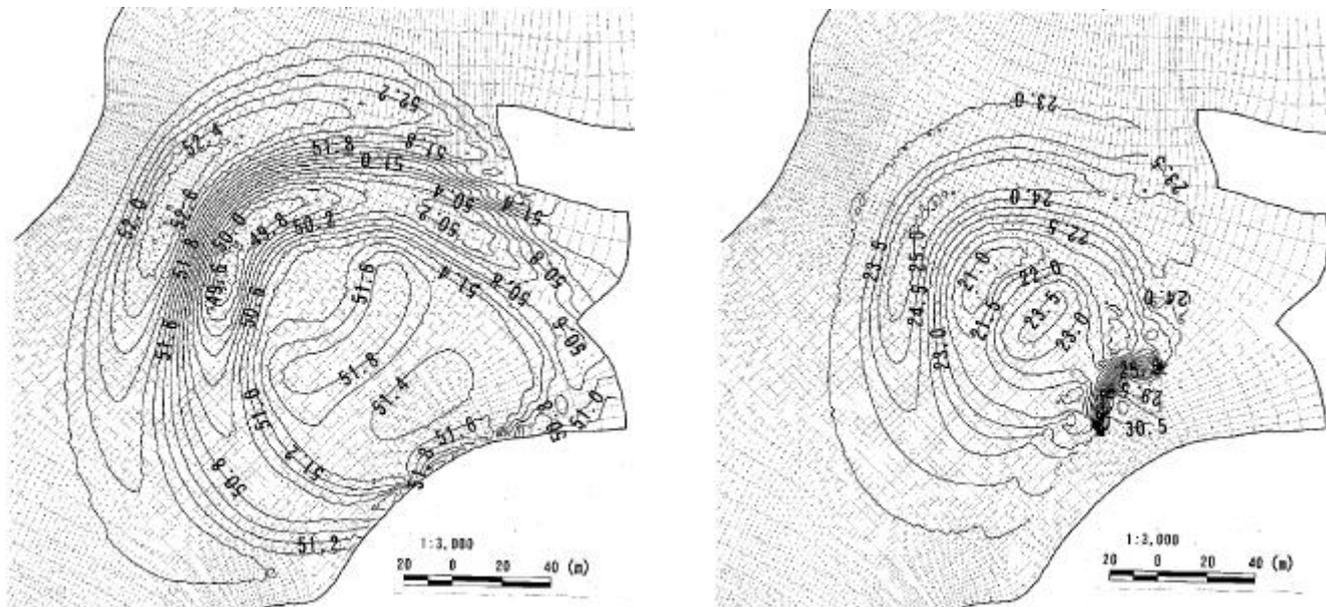
数値計算法においては、流速ベクトルおよび水位を直交曲線座標系におけるスタッガード格子に配列し、有限体積積分陰解スキームに基づいて時間ステップごとに前記支配方程式を離散化し、離散化した代数方程式を連立で解くことによる時間的および空間的に変化する流速ベクトル、水位および水面波などの結果を得る。

3. 解析例 上記モデルを用いて、ある閉鎖水域において崩落土砂に伴う水面波のシミュレーションを実施した。水体がほぼ静止状態から始まり、高水位(水深約51m)および低水位(水深約22.6m)の2ケースの解析を行った。Fig.3に、地すべり発生6秒後、それぞれ高、低水位状態での水位コンタ-を示した。Fig.3から、地す

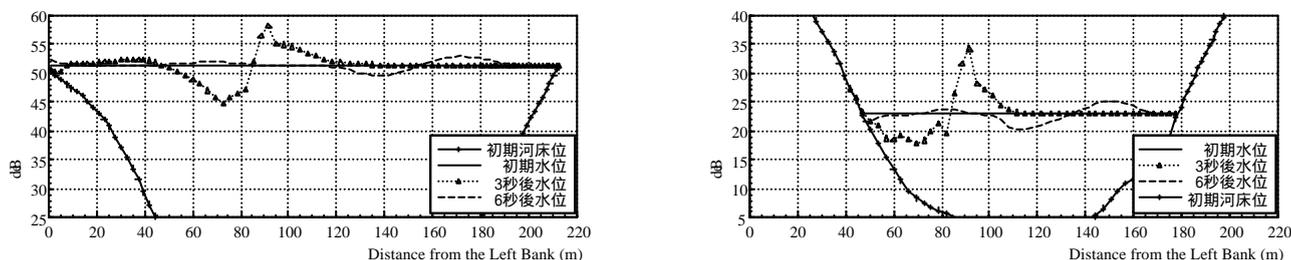
Keywords: Landslides, water surface wave, wave propagation, numerical simulation, boundary-fitted coordinates

¹ 〒300-1259 茨城県稲敷郡荖崎町稲荷原2304 Tel.: 0298-71-2039 Fax: 0298-71-2022 E-mail: a5313@n-koei.co.jp

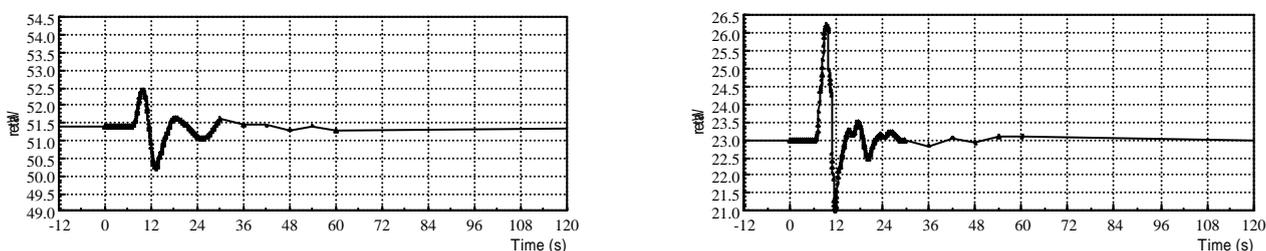
べりに伴う水面波が時間経過とともに広がり、高水位状態（水深が深い）での崩落土砂に伴う水面波の伝播は低水位状態（水深が浅い）での伝播より速いことが判った。このような水面波の波速は \sqrt{gh} で近似できるためである。Fig.4 には高水位および低水位状態での地すべり中心断面各時刻の水面形であり、水面波の伝播、波の遡上などを表した。Fig.5 に、それぞれ高、低水位状態での地すべり箇所対岸側水位の時間変化を示した。Fig.5 によると、高水位状態で地すべり箇所対岸側の最大水面波高は約 1m、最大波幅は約 2.2m である。一方、低水位状態で地すべり箇所対岸側の最大水面波高が約 3.26m、最大波幅が約 5.23m にまで達した。水深が相対的に浅い箇所において、土塊崩落に伴う激しい水面波が生じやすいことが裏付けられた。



(a) Higher water level condition (b) Lower water level condition
Fig.3 Contour of water surface level at 6 second after the sliding



(a) Higher water level condition (b) Lower water level condition
Fig.4 Water surface level at the slide section



(a) Higher water level condition (b) Lower water level condition
Fig.4 Water surface level at the opposite bank of the sliding

4. おわりに 境界適合直交曲線座標系における流入土砂による地形変化の影響および河床面すべりによる駆動力を考慮した平面 2 次元解析モデルを開発し、土砂崩落に伴う水面波をシミュレーションした。その結果、波の伝播を定量的に評価することができた。

本研究を行うにあたり種々御協力いただいた方々に感謝いたします。

参考文献 1) 吉松弘行ら：矩形体の貯水池進入を起因とする水波の予測，地すべり，No.1，Vol.29，1992. 2) 池谷 浩：土石流の分類，土木技術資料，Vol.20，No.3，1978. 3) 道上正規ら：貯水池内での斜面崩壊に伴う水面波に関する研究，水工学論文集，Vol.39，1995. 4) Jin *et al*, Numerical simulation of flow in ‘T’-shaped tidal river, Proceedings of the 3rd APCOM, Seoul, Korea, 1996.